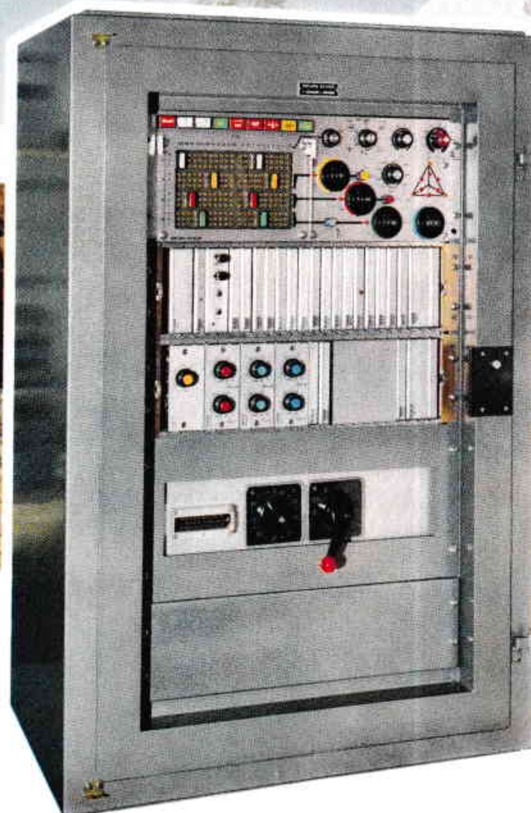
REVUE BROWN BOVERI





REV. BROWN BOVERI TOME 55 N° 7 PAGES 325 à 400 BADEN, JUILLET 1968

Imprimé en Suisse

REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & CIE, BADEN (SUISSE)

TOME 55 JUILLET 1968 N° 7

SOMMAIRE

Contribution de la Société Brown Boveri à l'électronique appliquée aux chemins de fer

621.33: 621.38
621.38: 621.33

Discernant l'importance que prenait l'électronique dans le domaine de la traction – malgré la réserve initiale compréhensible des administrations de chemins de fer – la Société Brown Boveri a assez tôt commencé à mettre au point des appareils intéressant les chemins de fer. Avec l'électronique appliquée à la commande, on utilise désormais des éléments de puissance à semi-conducteurs, de sorte qu'aujourd'hui les dispositifs statiques sont non seulement utilisés de plus en plus dans les systèmes de commande des véhicules moteurs ferroviaires, mais ils s'introduisent aussi, comme éléments de puissance, dans les circuits de courant des moteurs de traction. L'article présent donne un aperçu des différents genres d'appareils mis au point jusqu'ici, de leur tâche et des possibilités d'application qu'ils offrent.

Dans la traction, les deux concepts «la sécurité de déroulement du trafic» et «la sûreté de fonctionnement» ont une importance capitale; cela explique l'attitude réservée des sociétés ferroviaires quant à l'introduction de conceptions techniques nouvelles. On comprend ainsi la lenteur avec laquelle la technique moderne des semi-conducteurs, telle qu'elle est comprise dans le concept «électronique», est entrée dans les circuits de commande et de protection des équipements électriques des véhicules moteurs.

Quelques-unes des opinions de la tendance actuelle à rationaliser l'exploitation et à mettre au point des véhicules moteurs ferroviaires et leurs équipements de traction ont eu une incidence très heureuse sur l'électronique appliquée à la traction après les hésitations du début.

Ce sont:

– le désir d'augmenter constamment les prestations kilométriques des véhicules moteurs entre des travaux de révision en vue de rationaliser l'entretien et l'organisation des ateliers;

– le passage de la technique du réglage à la technique de la régulation dans les systèmes de commande des véhicules moteurs et le passage à la marche automatique des trains en vue de perfectionnement;

- la tendance à employer des systèmes de commande continue à la place des systèmes de commande à crans pour mieux utiliser l'adhérence;

Le remplacement des appareils de commande électromécaniques par des éléments électroniques a pour effet la diminution de l'entretien; les problèmes de la régulation de la marche et du freinage ainsi que ceux de l'automatisation de la traction ne peuvent être efficacement résolus qu'avec des éléments de l'électronique appliquée à la commande, tandis que les systèmes de commande continue demandent le recours aux éléments de puissance à semiconducteurs.

Les avantages particulièrement intéressants, offerts par l'utilisation des éléments de construction électroniques dans les véhicules ferroviaires, résident dans le fait que ceux-ci sont insensibles aux trépidations et conviennent particulièrement aux problèmes de commande comportant une grande fréquence de manœuvre.

D'autre part, ce domaine d'application exige que l'on tienne compte, en ce qui concerne les appareils électroniques, de certaines conditions d'exploitation, telles que:

- un large domaine de températures.

Dans les conditions climatiques régnant en Europe centrale, l'intérieur de la caisse d'une locomotive à l'arrêt sous les rayons du soleil d'été atteint des températures allant jusqu'à + 70 °C, tandis qu'elle prend en hiver une température pratiquement égale à celle de l'extérieur, de par exemple −20 °C. La Société Brown Boveri dimensionne les appareils destinés aux véhicules ferroviaires pour des températures comprises entre +85 °C et −20 °C, sans que leur fonctionnement en soit altéré. Dans le cas des véhicules moteurs, devant être utilisés dans des régions aux climats extrêmes, des températures plus élevées ou plus basses doivent également être envisagées.

- une protection efficace contre les surtensions.

Dans l'exploitation ferroviaire, il faut tenir compte de surtensions fréquentes, apparaissant sous forme de surtensions de manœuvre ou de surtensions d'origine atmosphérique. Afin d'éviter l'endommagement des appareils électroniques, un dispositif de protection contre les surtensions, de fonctionnement sûr, est absolument indispensable.

En connaissant l'importance qu'il fallait attribuer à l'électronique dans le domaine de la traction, la Société Brown Boveri a très tôt commencé les travaux de développement correspondants et mis au point des appareils intéressants pour les applications ferroviaires. Les lignes suivantes traitent ces questions.

Dispositif de commande électronique «progression/régression»

Ce dispositif de commande se distingue par le fait que le mécanicien ne commande aucun cran de marche déterminé, mais qu'il donne, avec le manipulateur, des ordres «prog.–régr.» au système de commande jusqu'à ce que le train atteigne la vitesse désirée. Le système électronique constitue ici l'appareil de commande statique de liaison entre le manipulateur et l'organe de réglage final du dispositif de commande du véhicule moteur; cet organe peut être un graduateur à haute ou à basse tension ou encore un dispositif de commande par contacteurs. Il tient en même temps compte, lors de manipulations, pour «marche» ou «freinage», d'une série de grandeurs d'influence et décharge ainsi le mécanicien des tâches correspondantes; ainsi, celui-ci peut davantage concentrer son attention sur la voie. Les ordres «prog.», «régr.», apparaissant à la sortie de l'appareil, arrivent directement et sans contact aux bobines de progression ou de régression du dispositif d'entraînement du graduateur ou dans le compteur réversible du dispositif de commande par contacteurs individuels (fig. 1).

Les paramètres, traités par le circuit électronique lors de l'émission des ordres, sont:

- le courant de démarrage maximal, jusqu'à ce qu'un ordre de progression soit envoyé au graduateur ou au dispositif de commande par contacteurs individuels lorsque l'ordre de progression est donné par le mécanicien. Le manipulateur comporte trois positions pour la «marche» et une position pour le «freinage»; à chacune de ces positions correspond un courant de démarrage déterminé. Lorsque la valeur du courant prédéterminé est dépassée, le circuit électronique bloque la progression jusqu'à ce que le courant descende en dessous de cette valeur.

- la répartition des puissances, qui permet d'atteler ensemble jusqu'à trois véhicules moteurs de puissances différentes, en marche en unités multiples, chaque véhicule intervenant, dans la puissance totale des véhicules, proportionnellement à sa puissance unihoraire. Cette répartition n'est efficace qu'en marche à régime établi et elle protège les moteurs de traction contre des contraintes thermiques trop élevées; d'autre part, elle laisse beaucoup de liberté dans l'attelage de véhicules de types différents en marche en unités multiples.

- le dispositif d'antipatinage et d'antiglissement qui détecte le patinage en mesurant les variations du courant absorbé par les moteurs de traction. Il

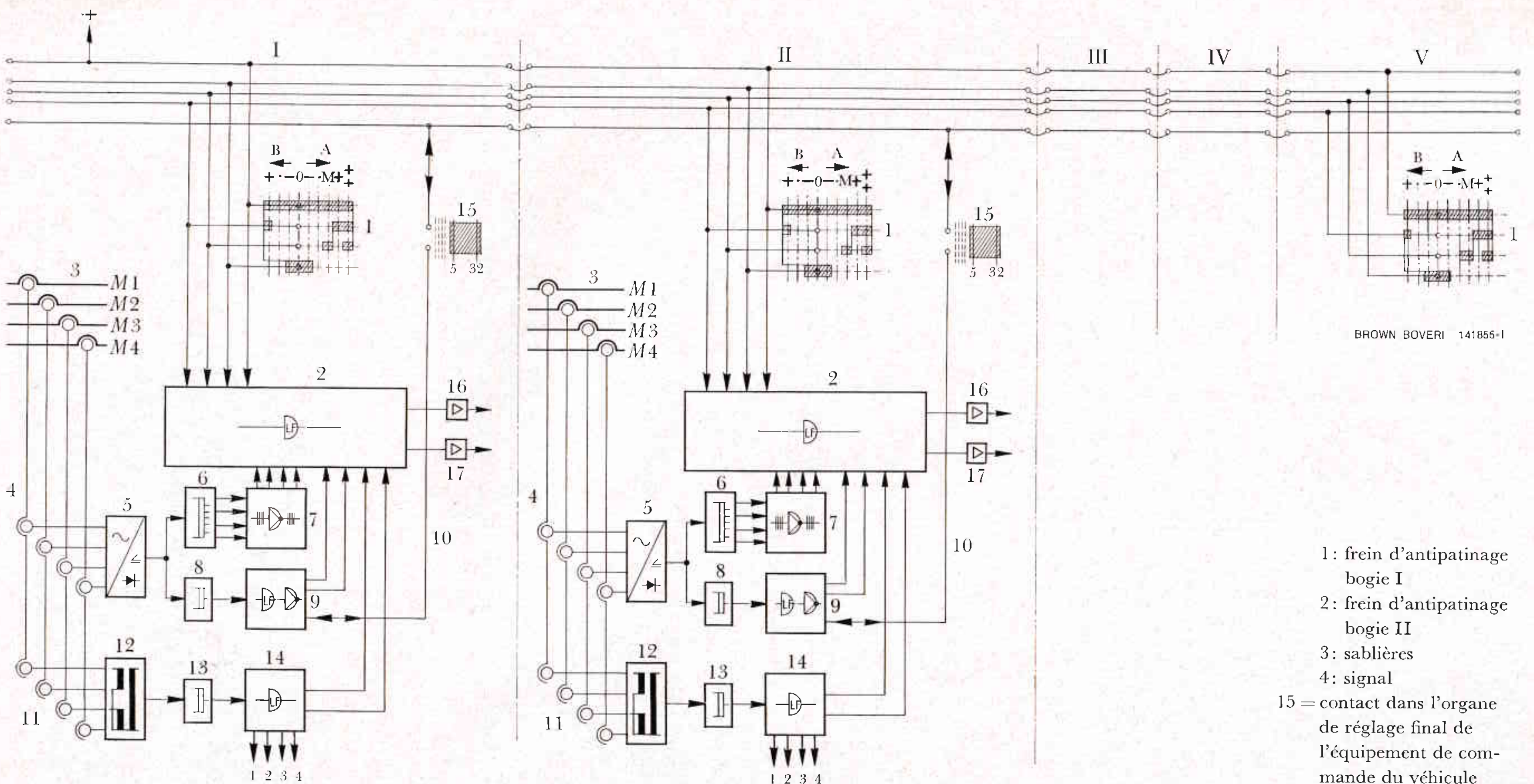


Fig. 1. – *Schéma de principe du dispositif électronique de commande progression/régression*

I = véhicule moteur 1
II = véhicule moteur 2 en traction double
III, IV = remorques intermédiaires
V = remorque pilote
1 = manipulateur
A: traction B: freinage
2 = circuit logique pour la commande à séquences
3 = transformateurs de courant pour moteurs de traction
4 = transformateurs de courant intermédiaires pour les relais de courant du dispositif de commande à séquences
5 = générateur de valeurs maximales
6 = résistance de réglage pour le relais de courant du dispositif de commande à séquences
7 = relais de courant pour les quatre ordres de progression destinés au dispositif de commande à séquences
8 = résistance de réglage pour la commande de répartition des charges
9 = dispositif de commande pour répartition des charges
10 = ligne de répartition
11 = transformateurs intermédiaires pour le dispositif d'antipatinage et d'antiglissement
12 = transformateur pour la formation des différences
13 = résistance de réglage pour le dispositif d'antipatinage et d'antiglissement
14 = circuit logique du dispositif d'antipatinage et d'antiglissement
1: frein d'antipatinage bogie I
2: frein d'antipatinage bogie II
3: sablières
4: signal
15 = contact dans l'organe de réglage final de l'équipement de commande du véhicule moteur (graduateur, par exemple)
16 = sortie et amplificateur «prog.»
17 = sortie et amplificateur «régr.»
+ = pôle de la batterie de commande
M_1 à M_4 = circuits de courant des moteurs de traction

est exécuté à deux niveaux (I: patinage faible, II: patinage fort), et distingue sélectivement le bogie qui patine. Au niveau I, le passage à un cran supérieur est bloqué et le frein d'antipatinage actionné sélectivement; après 20 s, le frein est automatiquement desserré. Sur le niveau II, l'équipement de commande est rétrogradé, tandis que le frein d'antipatinage entre en action. Lors du glissement, pendant le freinage électrique, le frein d'antipatinage est bloqué et l'équipement de commande rétrogradé. Dans tous les cas, l'état de choses est signalé à la cabine de conduite. Il est possible de connecter des sablières.

- le dispositif de surveillance de la résistance de passage dans le cas de commande par graduateur à haute tension.
  Il est composé d'un relais de courant temporisé électronique qui entraîne le déclenchement du disjoncteur principal du véhicule moteur lorsque la résistance de passage est, en cas de perturbation, parcourue de courant pendant plus longtemps que le temps correspondant à la durée du processus de passage et par suite à sa capacité de charge de courte durée.
- la commande du contacteur de passage dans le cas de la commande par graduateur à basse tension. L'ordre de progression entraîne l'excitation du contacteur qui enclenche pendant un temps court les résistances de passage en parallèle avec les bobines du diviseur de tension par l'intermédiaire d'un relais temporisé électronique avec retard de mise au repos et amplificateur.

Le dispositif de commande électronique «progression/régression» est monté dans deux boîtiers débrochables, du type LIX (fig. 2) normalisé par les Chemins de fer fédéraux suisses. La partie inférieure du boîtier, montée à demeure dans les véhicules moteurs, a les fonctions d'un support à broches et comporte à cet effet tous les éléments devant être adaptés aux caractéristiques de l'équipement de traction du type de véhicule moteur concerné, tels que transformateurs de courant intermédiaires, résistances de réglage, etc. Par contre, la partie débrochable supérieure du boîtier est construite de la même façon pour tous les types de véhicules moteurs. Elle comprend les plaquettes[1], qui constituent le véritable montage fonctionnel du dispositif de commande et les connexions logiques nécessaires. Cette conception de montage offre une grande latitude dans l'emploi des appareils, très appréciée par les exploitants, et permet de réduire le stock de pièces de rechange et d'organiser rationnellement l'entretien.

La Société Brown Boveri a jusqu'ici équipé de systèmes de commande progression/régression électroniques:

82 véhicules moteurs de grande puissance de la série RBe 4/4 e3w des Chemins de fer fédéraux suisses

115 locomotives de grande puissance de la série Re 4/4 II des Chemins de fer fédéraux suisses

1 locomotive de grande puissance du même type du Chemin de fer du sud-est suisse

3 trains automoteurs «Transalpin» des Chemins de fer fédéraux autrichiens

12 trains express interurbains des Chemins de fer fédéraux autrichiens
(deux autres équipements sont actuellement en construction)

[1] La plaquette est l'unité de construction de base de la technique électronique Brown Boveri. Elle est constituée par une plaque conductrice corrodée de 180 × 120 mm avec des composants soudés et un connecteur à broches sur un côté frontal.

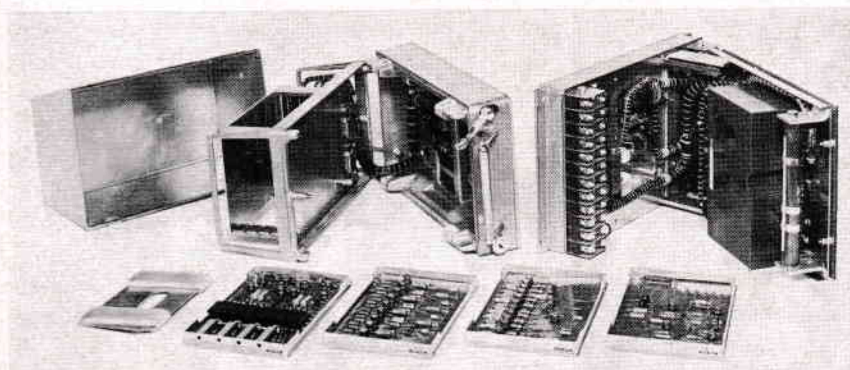


Fig. 2. – Dispositif électronique de commande progression/régression

Coffret LIX avec

dispositif de commande à séquences, amplificateurs de sortie, limiteur du courant de progression.

A gauche: la partie supérieure débrochable (coffret d'appareils)
A droite: la partie inférieure devant être montée à demeure (avec fiches)
A l'avant: plaquettes sorties du coffret

12 véhicules moteurs standardisés de chemin de fer secondaire pour des sociétés suisses privées

2 véhicules moteurs transformés et modernisés du Chemin de fer Régional du Val-de-Travers.

Dispositif électronique de commande à rattrapage

Dans ce dispositif électronique de commande, le mécanicien affiche une valeur de consigne en ajustant un cran de marche ou de freinage sur le manipulateur. Ensuite, le circuit électronique détermine le mouvement de l'organe de réglage du dispositif de commande du véhicule moteur (graduateur ou dispositif de commande par contacteurs) jusqu'au cran de marche ou de freinage désiré, c'est-à-dire jusqu'à ce que le générateur de valeurs instantanées, monté dans l'organe de réglage, donne une grandeur réglante qui est identique à la valeur introduite à l'aide du générateur de valeurs de consigne.

Une *exécution, basée sur la technique des circuits analogiques*, utilise des potentiomètres pour produire les valeurs de consigne et les valeurs instantanées. Ces potentiomètres sont alimentés par un générateur d'impulsions rectangulaires. Comme paramètre pour la formation d'un ordre de progression ou de régression, dans la commande des véhicules moteurs, est utilisé le déphasage, rapporté à la tension initiale, dans la branche du pont, comprise entre le générateur de valeurs de consigne et le (ou, en marche en unités multiples, chaque) générateur de valeurs instantanées. La solution avec tension rectangulaire et comparaison de phases, pour la formation de la grandeur réglée, fut choisie en raison de l'insensibilité du système obtenu vis-à-vis des tensions perturbatrices qui sont induites dans les lignes de contrôle des trains longs.

La partie électronique du dispositif de commande à rattrapage, en tiroir débrochable, est montée dans un boîtier de relais (fig. 3); elle peut également, comme le dispositif de commande progression/régression, être livrée dans un boîtier LIX.

La Société Brown Boveri a jusqu'ici livré des dispositifs électroniques de commande à rattrapage, basés sur la technique des circuits analogiques, pour:

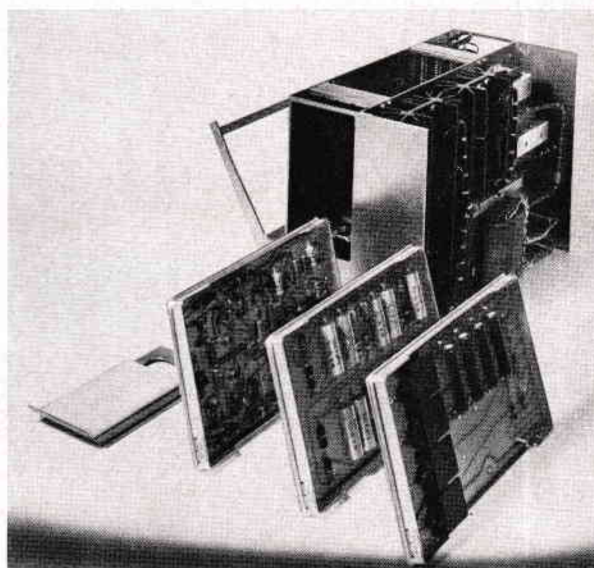
22 locomotives des séries Ae 6/8, Ae 4/4 I, Ae 8/8 et Ae 4/4 II de la Compagnie du Chemin de fer des Alpes bernoises Berne–Lötschberg–Simplon

5 locomotives série Ge 6/6 des Chemins de fer rhétiques (2 autres équipements sont actuellement en construction)



BROWN BOVERI 122550-I

a



BROWN BOVERI 122553-I

b

Fig. 3. – Dispositif de commande à rattrapage analogique

a: vue extérieure du coffret
b: tiroir avec plaquettes sorties

1 locomotive tri-courant Ae 4/6 III des Chemins de fer fédéraux suisses

5 rames automotrices à trois véhicules du Chemin de fer Lucerne–Stans–Engelberg (2 autres équipements sont actuellement en construction)

5 véhicules moteurs des Chemins de fer de l'Oberland bernois

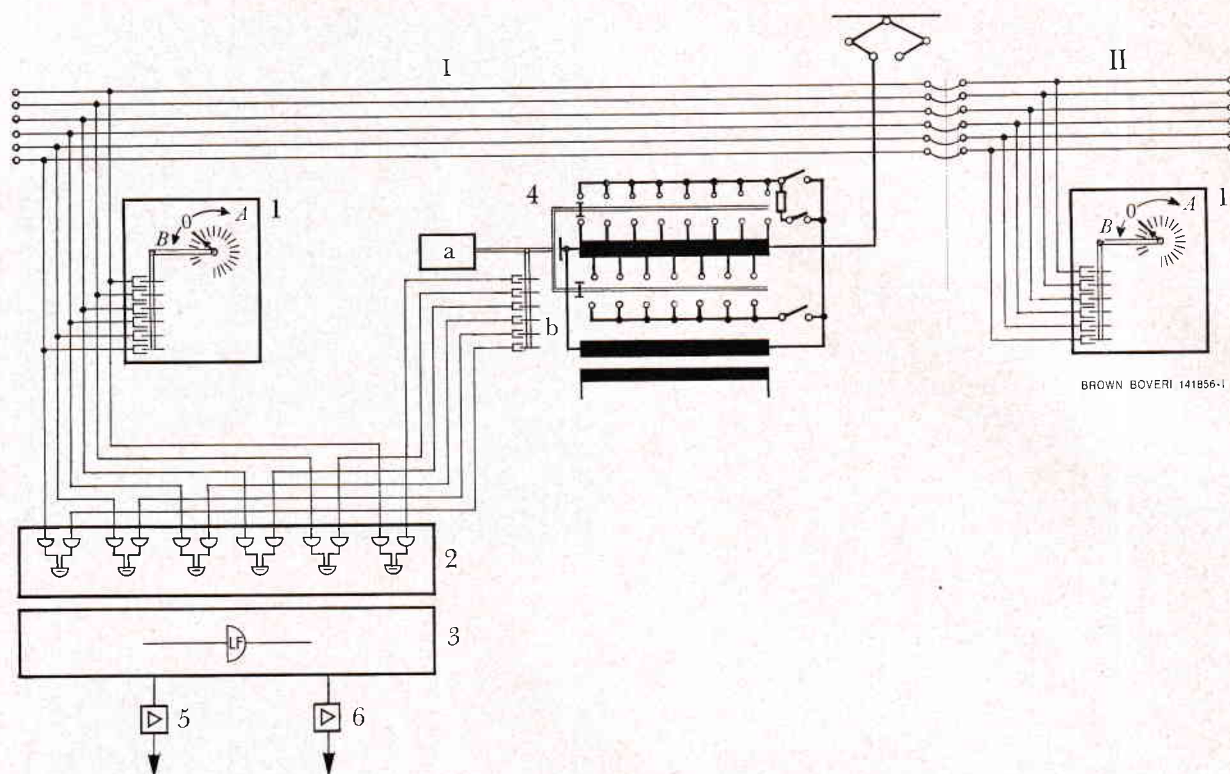


Fig. 4. – Schéma de principe du dispositif numérique de commande à rattrapage

I = véhicule moteur
II = remorque pilote
1 = manipulateur
A: marche
B: freinage
2 = comparateur de code de cran pour la commande à séquences
3 = logique «prog.»/«régr.» pour la commande à séquences
4 = organe de réglage final sur le transformateur principal (par ex. graduateur à haute tension)
a: dispositif d'entraînement
b: capteurs électroniques pour la formation de valeurs réelles
5 = sortie et amplificateur «prog.»
6 = sortie et amplificateur «régr.»

1 véhicule moteur à crémaillère de grande puissance du Chemin de fer Vitznau–Rigi

Un *dispositif de commande à rattrapage, qui utilise des éléments de construction numériques*, est le résultat des travaux de développement continus. Ici, toutes les informations de commande sont formées par codage à l'aide de seulement deux signes (0 et 1); en comparaison de l'utilisation des signaux sous forme analogique, la solution numérique procure une insensibilité beaucoup plus grande aux influences perturbatrices. Les contacts mécaniques auxiliaires ou les capteurs électroniques sans contacts, nécessaires à la formation des signaux de code, pour chaque cran du dispositif de commande du véhicule moteur, sur le manipulateur et sur l'organe de réglage final, sont commandés par cames mécaniquement ou influencés magnétiquement. Avec un code à six chiffres, il est possible de distinguer jusqu'à 63 crans du dispositif de commande de véhicule; un nombre correspondant de six cames sur le manipulateur et sur l'organe de réglage final sont nécessaires pour ce système de commande et il faut y ajouter six lignes de contrôle en marche en unités multiples (fig. 4). Les ordres de progression ou de régression, destinés au dispositif de commande, sont déduits par comparaison numérique directe, sur la base de différences de code entre la valeur de consigne et la valeur réelle et envoyés sans contacts, par l'intermédiaire d'amplificateurs, au dispositif d'entraînement de l'organe de réglage final (graduateur par exemple) (fig. 5).

Ce dispositif de commande à rattrapage, exécuté en technique numérique, a jusqu'ici été monté par la Société Brown Boveri dans

10 véhicules moteurs de grandes puissances des chemins de fer privés suisses.

Un *autre dispositif électronique de commande à rattrapage associé à un équipement de commande par contacteurs* a été

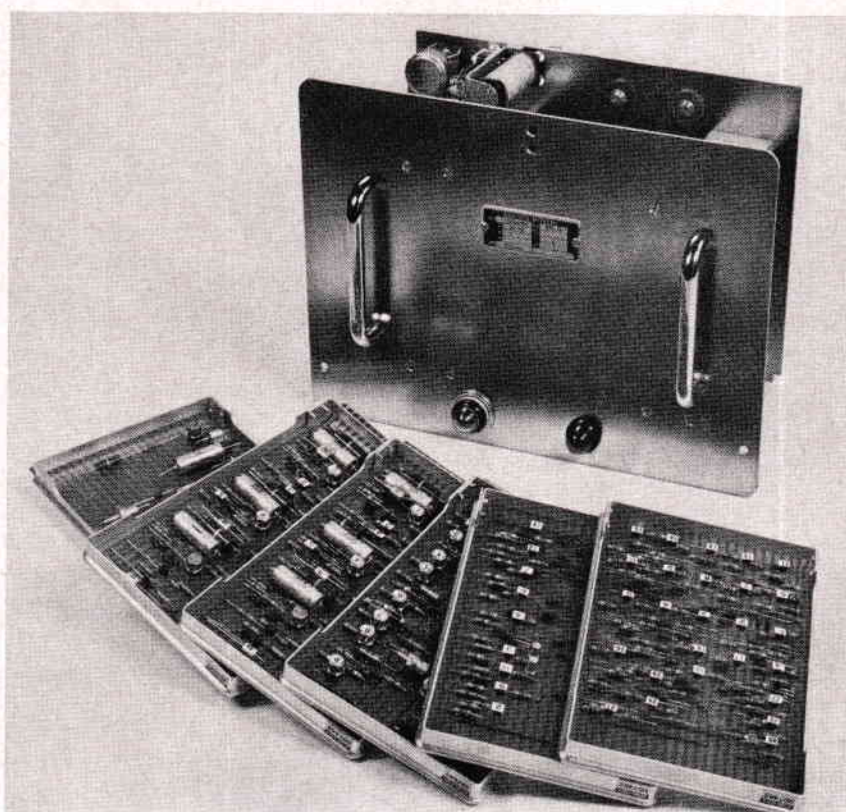


Fig. 5. – Dispositif numérique de commande à rattrapage

A l'avant: plaquettes sorties
A l'arrière: tiroir

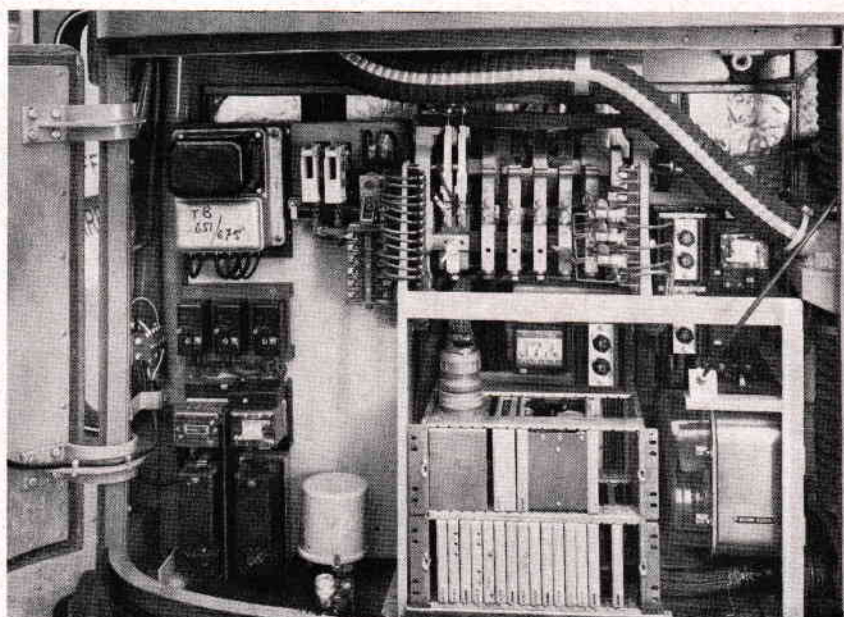
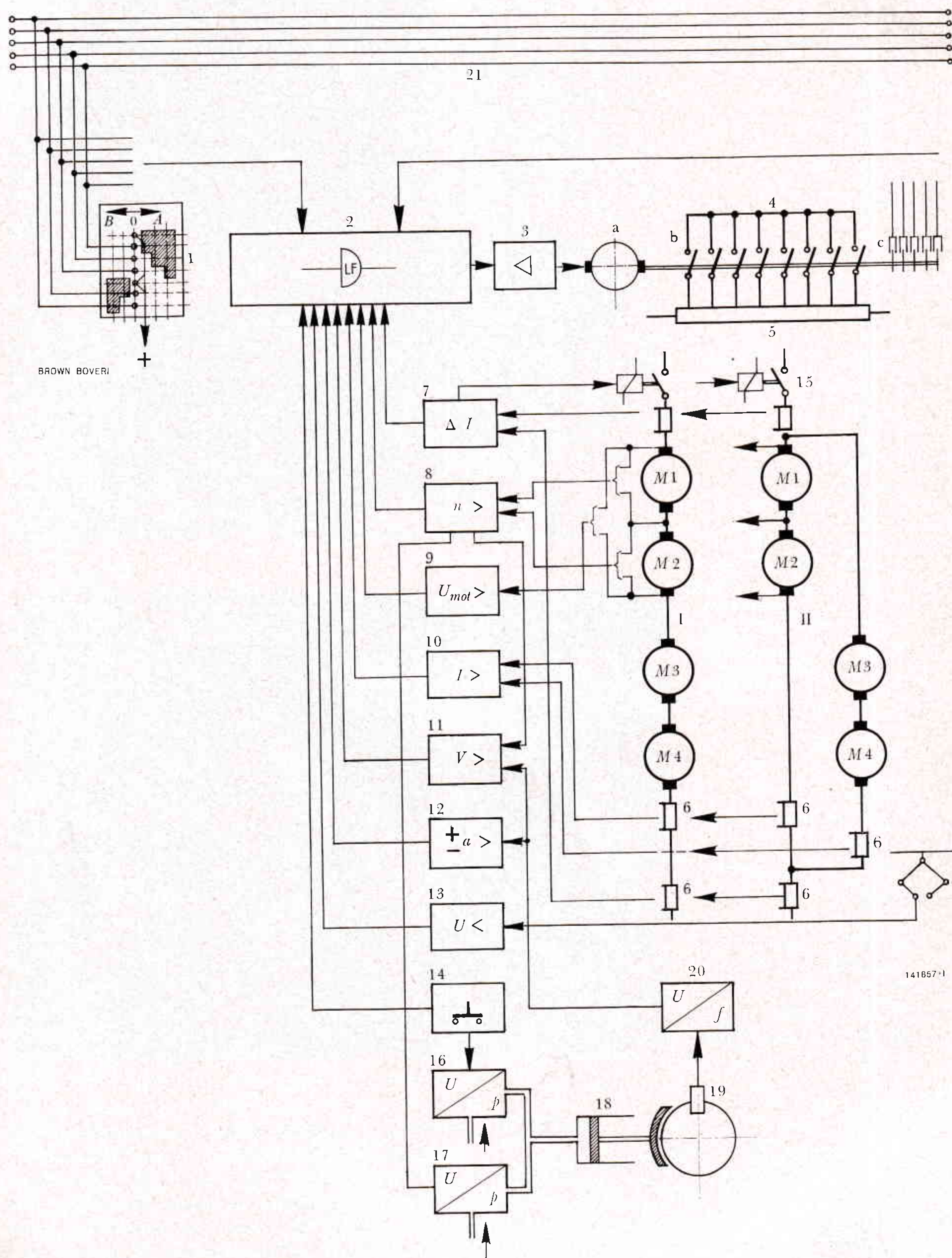


Fig. 6. – Dispositif électronique de commande à rattrapage, pour fonctionnement avec un dispositif de commande à contacteurs, monté sur un trolleybus des Transports Publics de la Région Lausannoise

mis au point pour les applications aux véhicules moteurs à courant continu pour trafic à petite distance, tels que les tramways et surtout les trolleybus.

La caractéristique de fonctionnement d'un équipement à contacteurs, composé d'éléments distincts, consiste en ce qu'à chaque cran de marche sont subordonnés des contacteurs individuels déterminés. Le dispositif de commande à rattrapage, mis au point à cet effet, transforme les données fournies par les crans du manipulateur en valeurs numériques qui sont introduites dans un discriminateur en tant que valeurs de consigne. Celui-ci reçoit en même temps



21
B
0
A
1
BROWN BOVERI
2
LF
3
a
b
4
c
5
15
7
Δ I
8
n >
9
U_{mot} >
10
I >
11
V >
12
± a >
13
U <
14
16
U
p
17
U
p
18
19
20
U
f
M1
M2
M3
M4
I
II
6
141657-I

la valeur réelle des crans, introduite également en binaire, et qui est formée par un totalisateur algébrique. La comparaison entre la valeur de consigne et la valeur réelle se fait dans le discriminateur, et la différence est envoyée comme ordre de progression ou de régression à la logique; si cette différence est nulle, aucun ordre n'est émis. L'ordre de progression, ou de régression, se trouvant à la sortie de la logique, entraîne la commande des contacteurs, en agissant sur le compteur; à cet effet, un rythmeur lent commande le processus de démarrage normal, et un rythmeur plus rapide agit si, après un déclenchement de courte durée, le cran de marche ajusté préalablement doit être de nouveau utilisé.

La logique est de plus influencée par un relais de courant, un relais d'accélération et par un dispositif de protection contre le patinage et le glissement qui bloquent la progression du système de commande par contacteurs lorsque les valeurs limites ajustées sont dépassées ou lors de l'apparition de patinage ou de glissement, jusqu'à la disparition des influences perturbatrices.

Les impulsions, émises par la logique, vont, en même temps que l'information, selon qu'il s'agit d'un comptage ou d'un décomptage, dans le compteur qui actionne les contacteurs du dispositif de commande du véhicule moteur, par l'intermédiaire d'un décodeur de crans, d'un sélecteur de contacteurs et d'amplificateurs. De plus, ce compteur fournit la valeur réelle de cran au discriminateur pour la comparaison des valeurs de consigne et des valeurs réelles. Le processus pour la commande du frein électrique est naturellement le même que celui de la marche.

Ce dispositif de commande à rattrapage, agissant sur l'équipement à contacteurs, est en service sur

5 trolleybus des Transports Publics de la Région Lausannoise (fig. 6)
1 automotrice du Chemin de fer de Wynental et Suhrental

En outre, il a été mis au point *un dispositif électronique de commande à rattrapage travaillant avec un combinateur à arbre à cames et servo-moteur* pour le trafic à petite distance, surtout pour les véhicules à courant continu des chemins de fer urbains et métropolitains.

Le manipulateur de cet équipement comprend trois positions de marche et deux positions de freinage. Les positions 1 sont celles de manœuvre; la position «marche 2» est le dernier cran de couplage en série; la position «marche 3» est le dernier cran de couplage en parallèle et la position «freinage 2» est le cran pour le freinage rhéostatique réglé automatiquement.

Les valeurs de consigne de crans, ajustées par les contacts du manipulateur, sont directement envoyées dans la logique du véhicule moteur propre ou par câbles, en marche en unités multiples, aux logiques des autres véhicules moteurs faisant partie du train. L'introduction des valeurs réelles dans la logique de chaque véhicule moteur se fait par des capteurs électroniques qui sont influencés sans contact par les cames du combinateur. La logique donne, également sans contact, des ordres de progression ou de régression, par l'intermédiaire d'un amplificateur, au servo-moteur du combinateur à arbre à cames jusqu'à ce que la comparaison de la valeur de consigne avec la valeur réelle montre que l'identité

◀ *Fig. 7. – Schéma de principe du dispositif électronique de commande à rattrapage pour fonctionnement avec un combinateur à arbre à cames, entraîné par servo-moteur*

1 = manipulateur A: marche
B: freinage
2 = logique pour commande à séquences
3 = amplificateurs
4 = combinateur à cames
a: servo-moteur
b: contacteurs à cames
c: capteur électronique pour signalisation de position
5 = résistance de démarrage et de freinage
6 = shunts des moteurs de traction
7 = relais différentiel de courant
8 = relais d'antipatinage et d'antiglissement
9 = relais de tension de freinage
10 = relais à maximum de courant
11 = relais pour la vitesse maximale
12 = relais pour accélération et décélération
13 = relais de tension nulle
14 = relais d'homme mort
15 = contacteur principal
16 = valve électrique pour freinage de secours
17 = valve électrique pour le frein d'antipatinage
18 = frein à air comprimé
19 = capteur magnétique pour mesure de vitesse
20 = convertisseur fréquence/tension pour la mesure de vitesse
21 = lignes de commande pour marche en unités multiples
M_1 à M_4 = moteurs de traction 1 à 4
I = couplage des moteurs de traction avec crans série
II = couplage des moteurs de traction avec crans parallèle
+ = pôle positif de la batterie de commande

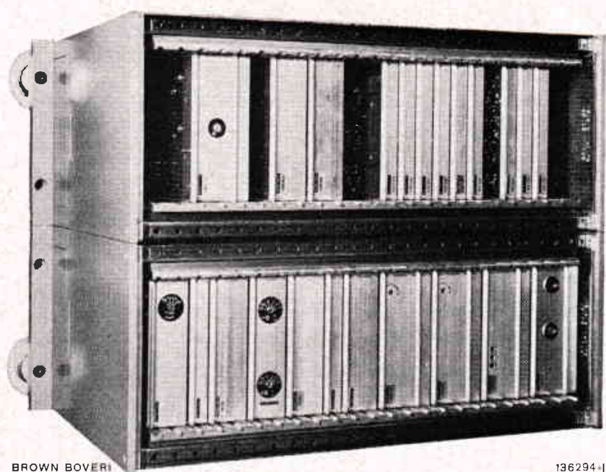


Fig. 8. – Dispositif électronique de commande à rattrapage pour fonctionnement avec un combinateur à arbre à cames

entre la position du manipulateur et celle du combinateur (fig. 7) est établie.

La progression se fait avec une accélération constante, ajustée en usine, comprise entre 0,8 et 1,2 m/s², par l'action d'un relais d'accélération sur la logique. Ce relais reçoit, comme valeur d'entrée, la vitesse réelle du véhicule moteur sous forme d'impulsions fournies par un capteur magnétique influencé par une roue d'engrenage. Si l'accélération au démarrage dépasse la valeur prescrite, le relais d'accélération donne à la logique l'ordre de bloquer la progression. De la même façon, le freinage se fait avec une décélération ajustée sur une valeur de consigne constante.

Les relais de protection suivants agissent sur la logique:

- un relais électronique à maximum de courant limite, par blocage de la progression du combinateur, le courant de démarrage lors du démarrage, et le courant dans la résistance de freinage lors du freinage.
- un dispositif électronique d'antipatinage et d'antiglissement mesure la différence de tension entre les deux moteurs de traction d'un bogie et donne par sa mise au travail un ordre de blocage de la progression à la logique et un ordre de commande à une soupape électro-pneumatique pour actionner le frein d'antipatinage.
- un relais électronique de mesure et de surveillance de la tension de freinage, qui donne, lors du freinage, un ordre de blocage de la progression au combinateur par l'intermédiaire de la logique, lorsque la tension du moteur de traction dépasse la valeur admissible.
- un relais électronique de surveillance de la vitesse, alimenté par un capteur magnétique disposé sur une roue dentée, qui déclenche le contacteur principal, lorsque la vitesse maximale ajustable est dépassée et remet à zéro le dispositif d'entraînement du combinateur par l'intermédiaire de la logique.

En outre, trois relais électromécaniques, à savoir un relais différentiel pour les moteurs de traction, un relais à déclenchement par manque de tension et un relais d'homme mort, entraînent, par l'intermédiaire de la logique, le déclenchement du contacteur principal et la régression jusqu'à zéro du combinateur; le relais d'homme mort donne un ordre de freinage de secours. En raison du petit nombre de fonctionnements de ce relais, l'exécution électromécanique a été encore maintenue ici.

La Société Brown Boveri a livré des dispositifs de commande à rattrapage avec arbre à cames et servo-moteur (fig. 8), pour véhicules moteurs à courant continu pour trafic à petite distance, pour

3 véhicules moteurs du Ferrocarril Metropolitano de Barcelona S.A. (S.P.M.) (50 autres équipements de véhicules moteurs pour la même société sont actuellement en construction).

Dispositif électronique d'antipatinage et d'antiglissement

Alors qu'il y a encore quelques années, une indication de patinage ou un dispositif d'antipatinage étaient considérés comme confort de service supplémentaire, un dispositif d'antipatinage à action automatique représente aujourd'hui une partie indispensable de l'équipement de traction, en raison de l'utilisation de l'adhérence, poussée jusqu'à la limite, dans les véhicules moteurs de grandes puissances modernes. Un tel dispositif d'antipatinage est d'autant plus efficace que son fonctionnement est plus sensible et qu'il intervient plus rapidement dans la commande. Ce dernier point de vue est également très important pour les développements qui vont suivre, parce que les temps propres des dispositifs de commande des véhicules moteurs ou des dispositifs de régulation deviennent très courts avec l'emploi croissant des redresseurs à semi-conducteurs commandés (thyristors) et les temps de mise en action des dispositifs d'antipatinage et d'antiglissement doivent être du même ordre de grandeur, afin que les avantages du dispositif de commande des véhicules moteurs à action rapide soient entièrement utilisés. Outre les dispositifs d'antipatinage déjà mentionnés, avec comparaison de courant et de tension, la Société Brown Boveri a, dans ce but, mis au point le dis-

positif électronique d'antipatinage et d'antiglissement décrit ci-dessous.

Le patinage et le glissement des roues des véhicules moteurs sont déterminés à l'aide de dynamos tachymétriques (ou à l'aide de générateurs d'impulsions avec convertisseurs fréquence/tension) individuellement sur chaque essieu, c'est-à-dire directement au lieu même de leur naissance et sans faire intervenir des grandeurs de mesure auxiliaires, comme, par exemple, dans le cas où on a recours à la comparaison de courants. L'appareil comprend quatre degrés de fonctionnement pour le patinage et un degré pour le glissement, lesquels sont caractérisés en particulier par des actions suivantes sur le dispositif de commande des véhicules moteurs:

Traction

Degré 1: léger patinage (correspondant à une différence de vitesse d'environ 4 km/h)
- application sélective de courte durée du frein d'antipatinage, avec desserrage automatique après 7 s
- blocage de la progression de l'équipement de commande
- mise en action de la sablière, facultative
- signalisation à la cabine de conduite

Degré 2: patinage moyen (correspondant à une différence de vitesse d'environ 10 km/h)
- application sélective du frein d'antipatinage, et illimitée dans le temps
- rétrogradation de l'équipement de commande
- mise en action de la sablière, facultative
- signalisation à la cabine de conduite

Degré 3: fort patinage avec une grande accélération angulaire (correspondant à une accélération linéaire $\geqq 3$ m/s²)
- application du frein d'antipatinage sur toutes les roues motrices
- rétrogradation de l'équipement de commande
- signalisation à la cabine de conduite

Degré 4: emballement avec une vitesse de 10% supérieure à la vitesse maximale
- déclenchement du disjoncteur principal

Freinage

Commence déjà aux petits glissements (correspondant à une différence de vitesse d'environ 4 km/h)
- rétrogradation de l'équipement de commande lors du freinage électrique
- action sur la soupape de dégagement d'air des cylindres du frein pneumatique
- signalisation à la cabine de conduite

Ce dispositif d'antipatinage est universel, c'est-à-dire qu'il convient aussi à la traction non électrique par une adaptation adéquate des signaux de sorties. Le montage se fait ici également par un coffret débrochable du type LIX (fig. 9). Pour la pleine utilisation des possibilités offertes, c'est-à-dire l'application sélective du frein d'antipatinage, l'équipement de freinage pneumatique des véhicules moteurs doit comprendre un cylindre de frein individuel sur chaque essieu.

La Société Brown Boveri a jusqu'ici équipé de ce dispositif électronique d'antipatinage les véhicules moteurs suivants:

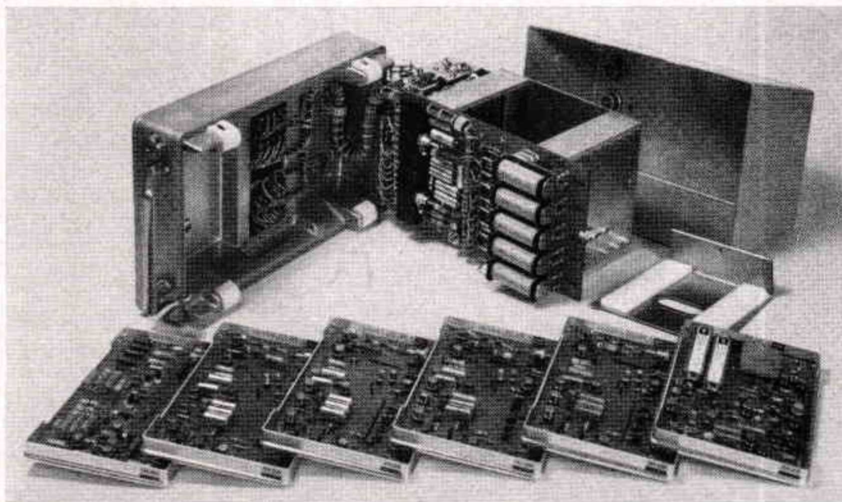
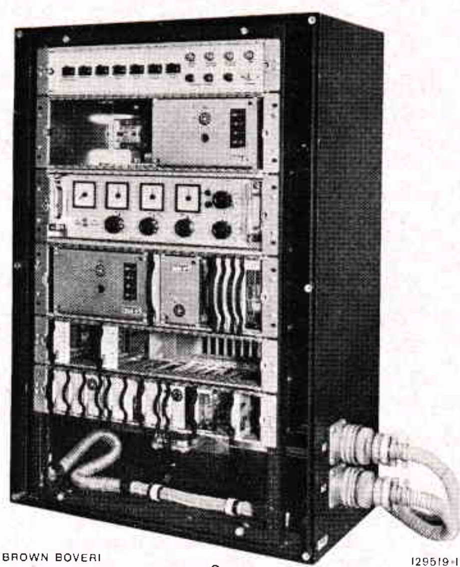


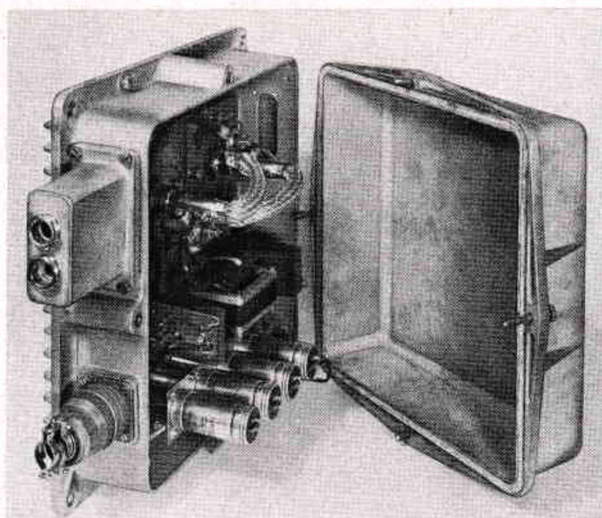
Fig. 9. – Dispositif électronique d'antipatinage et d'antiglissement

115 locomotives de grandes puissances, série Re 4/4 II des Chemins de fer fédéraux suisses (Le dispositif de commande progression/régression de ces locomotives comprend également le dispositif d'antipatinage basé sur la détection des différences de courant, et ceci parce qu'il est également monté sur les véhicules moteurs de grandes puissances RBe 4/4 et parce qu'on désire une exécution d'appareils unifiée)

1 locomotive de grande puissance du même type du Chemin de fer du Sud–est suisse.



a



b

Blocs d'excitation de frein commandés par thyristors pour véhicules moteurs à courant alternatif avec frein rhéostatique

Les véhicules moteurs électriques de grandes puissances sont aujourd'hui souvent équipés d'un frein électrique puissant pour augmenter d'une part la puissance de freinage des trains et pour diminuer d'autre part l'usure des sabots de frein. L'équipement de commande électronique, mis au point par la Société Brown Boveri pour le freinage rhéostatique des véhicules moteurs à courant alternatif, comprend également une limitation automatique à la valeur maximale admissible du courant de freinage dans les induits des moteurs de traction, et une influence réciproque du frein électrique et du frein pneumatique en cas d'une mise en action simultanée des deux freins, sous forme d'une limitation du courant d'excitation dépendant de la pression pour éviter tout surfreinage. Le mécanicien est donc déchargé de l'observation des valeurs limites correspondantes.

L'excitation séparée des inducteurs des moteurs de traction, se trouvant en série en régime de freinage, se fait à partir d'une prise du transformateur principal, par l'intermédiaire d'un groupe de thyristors en montage antiparallèle, avec transformateur d'excitation et redresseur à semi-conducteurs. La grandeur réglée pour le courant d'excitation est ajustée sous forme d'une tension continue négative, sur un potentiomètre monté sur le manipulateur, et envoyée dans le dispositif de commande transistorisé du groupe de thyristors par l'intermédiaire de l'une des entrées d'un amplificateur des valeurs maximales. L'écart de consigne formé par la comparaison des valeurs de consigne avec des valeurs réelles du régulateur de la valeur limite (limitation de la valeur maximale et adaptation selon les variations de la pression de freinage), est appliqué à la seconde entrée de l'amplificateur de valeurs maximales. Celui-ci laisse apparaître, à sa sortie, la valeur d'entrée la plus positive, c'est-à-dire celle qui provoque le courant d'excitation le plus petit; et c'est cette valeur qui sert à la commande du groupe de thyristors.

La valeur réelle pour la limitation de la valeur maximale est obtenue sous forme d'une tension négative à l'aide d'un transformateur de courant continu dans le circuit des deux moteurs de traction et est comparée, à la sortie d'un amplificateur de valeurs minimales, avec la valeur de con-

Fig. 10. – Bloc d'alimentation à thyristors pour freinage rhéostatique

a: appareil de commande électronique
b: organe de réglage final thyristorisé

signe ajustable, sous forme d'une tension continue positive. La différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle forme, à la sortie d'un amplificateur de réglage, la seconde valeur d'entrée, déjà mentionnée, dans les amplificateurs de valeurs maximales. Si le courant de freinage, déterminé par le cran du manipulateur et les conditions de traction instantanées, est inférieur à sa valeur maximale, la grandeur réglante pour la commande des thyristors dans le dispositif d'excitation, introduite à l'aide du manipulateur, agit; au contraire, si le manipulateur est déplacé dans le sens des efforts de freinage élevés et si la valeur maximale de courant de freinage est dépassée, le passage du manipulateur sur les crans supérieurs reste sans effet, parce qu'alors, la grandeur réglée, fournie par le régulateur du courant limite, correspond au courant d'excitation le plus petit.

La limitation du courant de freinage, dépendant de la pression de freinage, est choisie de telle sorte que lors de l'action simultanée des freins électrique et pneumatique, l'effort de freinage conjugué des deux systèmes de frein n'utilise l'adhérence entre la roue et le rail qu'avec seulement $\mu = 0{,}15$. C'est pourquoi si, lors d'un freinage électrique, le frein à air comprimé est également actionné, il en résulte une diminution de la valeur limite du courant d'excitation en quatre crans, en fonction de la pression croissante du cylindre de frein. A cet effet, la valeur réelle du courant d'excitation est envoyée dans une résistance de charge commutable, avant son introduction dans l'amplificateur de valeurs maximales mentionné; la commutation se fait par des contacts de quatre interrupteurs pneumatiques en fonction de la pression dans le cylindre de frein. En freinage par air comprimé, le domaine à pression élevée (freinage R), commandé par un relais de courant, est supprimé dès que ce dernier fonctionne lors de la mise en action du frein électrique.

L'appareil de commande électronique est monté dans un coffret à cadre pivotant, étanche à la poussière. L'organe de réglage final, constitué par le groupe de thyristors en montage antiparallèle destinés au réglage du courant d'excitation, est monté dans un coffret moulé en métal léger (fig. 10).

Ces blocs d'excitation de frein, commandés par thyristors, pour le freinage rhéostatique, avec dispositif de régulation du courant limite, ont été jusqu'ici livrés par la Société Brown Boveri pour:

3 trains automoteurs «Transalpin» des Chemins de fer fédéraux autrichiens

12 trains express des Chemins de fer fédéraux autrichiens (deux autres équipements sont actuellement en construction)

et sans dispositif de régulation du courant limite pour:

5 locomotives à redresseurs de la série Ae 4/4 II de la Compagnie du Chemin de fer des Alpes bernoises Berne–Lötschberg–Simplon

7 véhicules moteurs de grande puissance des Chemins de fer privés suisses

5 rames motrices à trois unités, du Chemin de fer Lucerne–Stans–Engelberg (2 autres équipements sont actuellement en construction)

Dispositif automatique de marche et de freinage avec régulation de vitesse et freinage d'arrêt au but

L'automatisation trouve, également dans la traction, une application croissante; les raisons de son emploi et l'importance qu'on lui donne peuvent être différentes dans les différentes sociétés ferroviaires. Le service ferroviaire avec des vitesses maximales exige une régulation de marche automatique afin que le mécanicien puisse concentrer toute son attention sur la voie. Les marches de trains avec régulation de vitesse se font de façon régulière et permettent d'utiliser au maximum la ligne. Les trains pour trafic urbain et les trains métropolitains demandent des arrêts fréquents et très précis à des points déterminés des quais de sorte qu'un arrêt automatique au but rend le déroulement régulier du service indépendant du doigté du mécanicien.

Un dispositif automatique de marche et de freinage, pour véhicules moteurs, se compose de boucles de régulation pour la vitesse de marche et le freinage d'arrêt au but, avec intervention supplémentaire sous forme d'une limitation de courant pour la protection contre les surcharges et d'un dispositif d'antipatinage et d'antiglissement (fig. 11). Les valeurs de consigne pour la vitesse peuvent être affichées manuellement ou par des équipements de transmission de l'information entre la voie et le véhicule moteur; de même, la mise en action du système de freinage au but se fait manuellement par bouton-poussoir ou par une influence provenant de la voie.

La boucle de régulation pour la vitesse commence par comparer entre elles les valeurs de consigne et réelle de la vitesse. La valeur de consigne est formée manuellement sur un potentiomètre sous forme d'une tension; parallèlement, des valeurs de consigne de vitesse peuvent aussi être introduites par l'intermédiaire de l'équipement de réception du système de transmission de l'information à partir de la voie. Un amplificateur de valeurs minimales, qui possède

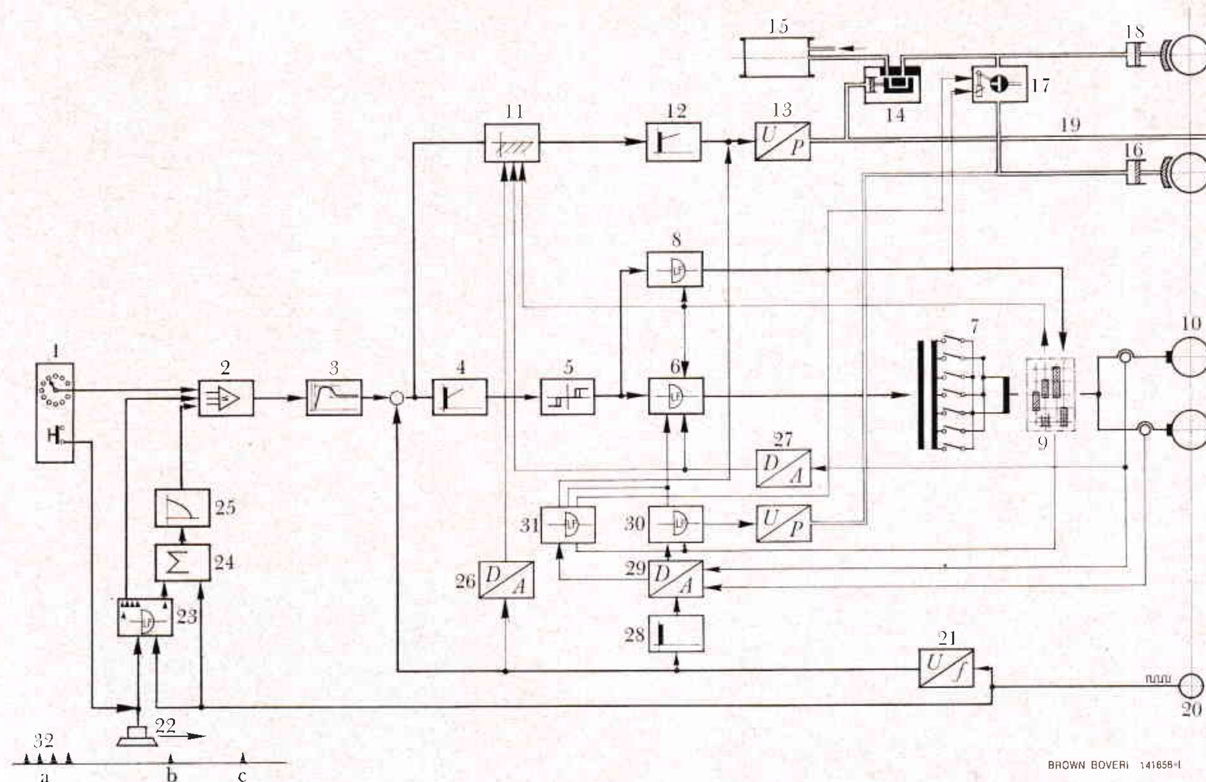


Fig. 11. – Schéma de principe d'un équipement automatique de marche et de freinage pour un véhicule moteur avec dispositifs de régulation de vitesse et d'arrêt au but

1 = pupitre de commande automatique
en haut: affichage de vitesse
en bas: déclenchement manuel du freinage au but
2 = amplificateur de valeurs minimales pour introduction de valeurs de consigne
3 = générateur de valeurs de consigne
4 = amplificateur
5 = régulateur à trois niveaux
6 = logique pour «progression»/«régression»
7 = organe de réglage final sur le transformateur principal (par ex. graduateur)
8 = logique pour «marche»/«freinage»
9 = commutateur marche/freinage
10 = moteurs de traction
11 = logique pour caractéristique de freinage
12 = amplificateur
13 = soupape de frein commandée électriquement de la cabine de conduite
14 = soupape de commande pour le frein à air comprimé
15 = réservoir d'air auxiliaire pour le frein à air comprimé
16 = frein à air comprimé du bogie moteur
17 = soupape de dégagement d'air pour le frein du bogie moteur
18 = frein à air comprimé du bogie porteur (s'il existe)
19 = conduite d'air couvrant tout le train pour frein à air comprimé
20 = générateur d'impulsions
21 = convertisseur fréquence/tension
22 = récepteur pour la transmission ponctuelle de l'information
23 = évaluateur d'impulsions pour transmission de l'information et émission de valeurs maximales pour limitation de la vitesse
24 = compteur de parcours
25 = générateur de fonction pour la parabole du freinage d'arrêt au but
26 = dispositif de signalisation de l'arrêt
27 = relais à maximum de courant
28 = amplificateur différentiateur
29 = commutateur de valeur de seuil pour variations de vitesse et différence de courant
30 = logique d'antipatinage
31 = logique d'antiglissement
32 = aimants de voie pour transmission de l'information
a: pour début de la limitation de vitesse
b: pour fin de la limitation de vitesse
c: pour mise en action du frein d'arrêt au but

aussi une entrée pour la valeur de consigne de vitesse provenant de l'équipement de freinage d'arrêt au but, choisit comme valeur de consigne la valeur de vitesse la plus petite, et l'envoie au générateur de valeurs de consigne. La valeur réelle est fournie par un générateur d'impulsions entraîné par l'un des essieux du véhicule moteur et alimentant un convertisseur fréquence/tension.

L'écart de consigne, formé par la différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle, est introduit dans la boucle de régulation «marche et freinage électriques» et arrive, en passant par un amplificateur, dans un régulateur à trois niveaux qui forme les ordres «accroître la vitesse», «diminuer la vitesse» et «maintenir la vitesse» et qui les envoie dans un circuit logique, lequel décide s'il faut faire progresser ou rétrograder le graduateur ou s'il faut amener l'inverseur marche–freinage dans la position marche ou dans la position freinage. Lorsqu'il s'agit de véhicules moteurs avec équipement de commande par contacteurs, le circuit logique est encore complété par un compteur de crans et un sélecteur de contacteurs. La boucle de régulation se ferme par les moteurs de traction, les essieux moteurs et le générateur d'impulsions.

L'écart de réglage est en même temps introduit dans la boucle de régulation du «frein à air comprimé» et il arrive au système de freinage pneumatique en passant par un circuit logique de caractéristique de freinage, un amplificateur de réglage et un robinet de mécanicien à commande électrique (ou robinets de freinage électro-pneumatiques). La boucle de régulation se ferme par les cylindres de frein, les sabots de frein, les essieux moteurs et le générateur d'impulsions.

Le freinage d'arrêt au but utilise aussi l'appareillage de la régulation de la vitesse. Selon la courbe de freinage, «vitesse le long du parcours», correspondant à la puissance de freinage du train, un généra-

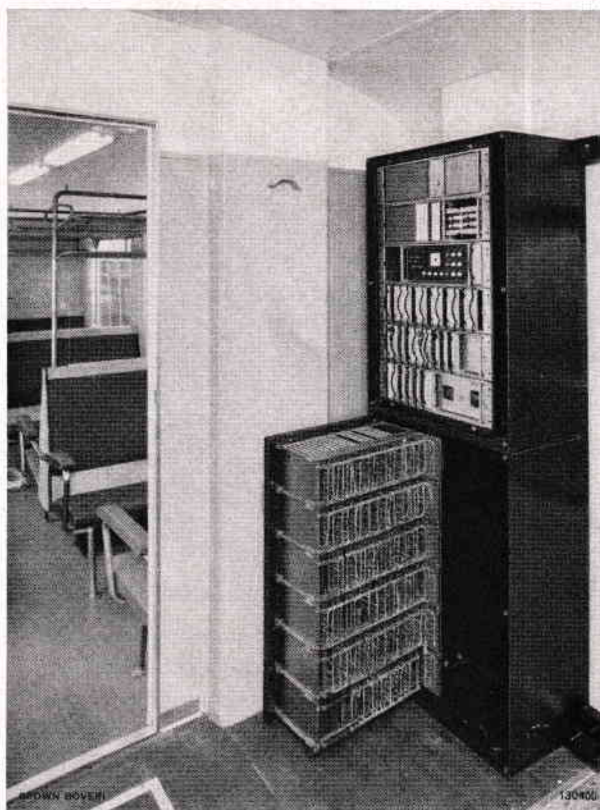


Fig. 12. – Equipement automatique de traction et de freinage d'un train-navette électrique du Chemin de fer Bodensee–Toggenburg

Armoire de l'appareillage électronique.

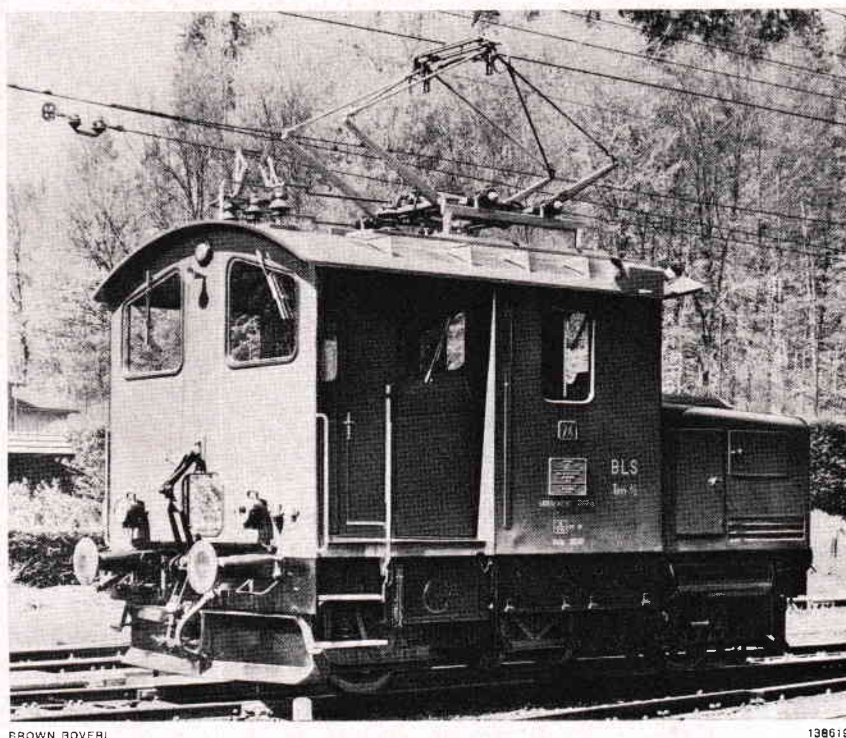


Fig. 13. – Tracteur de manœuvre à commande à thyristors Tem 2/2 de la Compagnie du Chemin de fer des Alpes bernoises Berne–Lötschberg–Simplon

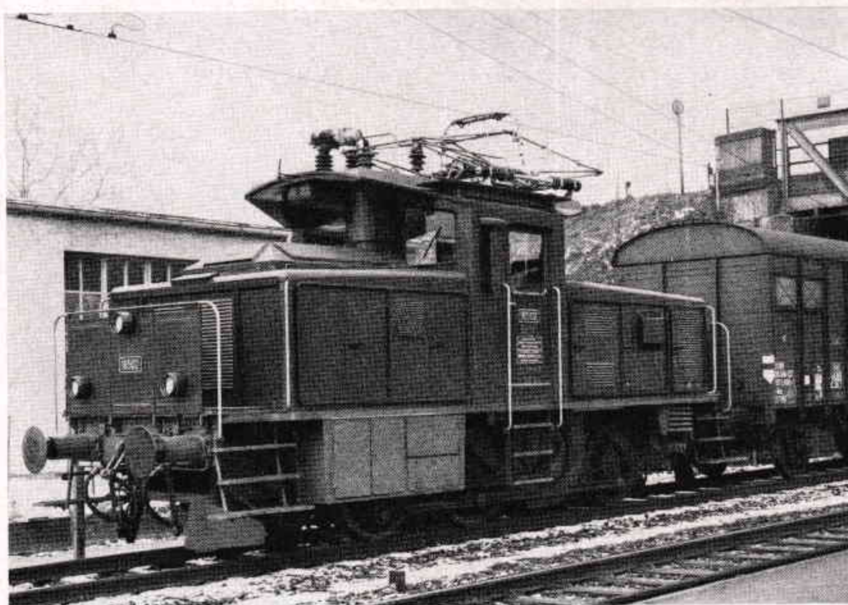


Fig. 14. – Locomotive de manœuvre à commande à thyristors Ee 3/3 II des Chemins de fer fédéraux suisses avec freinage par récupération

teur de fonctions produit la valeur de consigne de la vitesse en fonction du parcours, qui, après le passage du point de mise en action du freinage d'arrêt au but, est également introduite dans l'amplificateur des valeurs minimales, déjà mentionné, pour arriver ensuite au générateur de valeurs de consigne. Le point de mise en action du freinage au but est situé en amont du point d'arrêt à une distance telle que le train, roulant à la vitesse maximale à la hauteur du point de mise en action du freinage puisse s'arrêter au point d'arrêt. Dans les chemins de fer urbains et métropolitains, les types des gares sont différents selon la position des entrées et des sorties (au milieu du quai – à l'avant seulement – à l'arrière seulement) et suivant la longueur de train (de trois, de six ou de neuf voitures, par exemple), et les points d'arrêt désirés seront par suite différents. Lors de la mise en action automatique du freinage au but, par exemple par action ponctuelle à partir de la voie, l'information à transmettre pouvant différer suivant le type de gare et la longueur de train peut être réglée à partir de la cabine de conduite.

Le système de régulation de la vitesse et l'équipement de freinage au but, ainsi que l'affichage manuel ou l'action automatique à partir de la voie, peuvent être réalisés individuellement et l'un après l'autre avec des blocs indépendants.

L'équipement prototype pour la régulation de la vitesse a été déjà monté en 1962 dans un véhicule moteur de grande puissance de la série RBe 4/4 des Chemins de fer fédéraux suisses et essayé avec le frein à air comprimé et le frein à air comprimé à commande électrique.

Un train-navette de banlieue du Chemin de fer Bodensee–Toggenburg est équipé d'un système de marche et de freinage entièrement automatique, où la régulation de vitesse lors de limitations de vitesse, et l'équipement de freinage au but, sont en partie influencés à partir de la voie par une transmission ponctuelle de l'information codée à l'aide d'aimants de voie.

Dans le trafic de la banlieue parisienne, les Chemins de fer français ont procédé à de nombreux essais de freinage avec arrêt au but par action ponctuelle, réalisée par aimants de voie, sur un véhicule moteur à courant alternatif et un autre à courant continu. A l'heure actuelle, trois rames automotrices à courant continu de la Région sud-ouest sont en train d'être équipées de dispositifs de freinage avec arrêt au but pour la mise en service régulier.

Les appareils et équipements, décrits jusqu'ici, de l'électronique appliquée à la traction, concernent le domaine de l'électronique appliquée à la commande. Afin de compléter cet exposé, nous allons décrire quelques réalisations de l'électronique de puissance. On entend par là la technique des semiconducteurs, dans laquelle des redresseurs à semiconducteurs commandés, sous forme de thyristors, trouvent leur application dans les circuits de puissance.

Tracteur commandé par thyristors de la Compagnie du Chemin de fer des Alpes bernoises Berne–Lötschberg–Simplon

Ce tracteur à deux essieux et à deux forces motrices de la série Tem 2/2 possède un équipement de trac-

tion à courant alternatif, comprenant deux moteurs, d'une puissance unihoraire de 230 kW (315 ch) et un groupe Diesel alimentant les moteurs de traction en courant continu (fig. 13). En service en alternatif à partir de la caténaire, un montage en pont semi-commandé et asymétrique, constitué de thyristors et de diodes au silicium, relié à demeure à la borne à tension la plus élevée du transformateur alimente les moteurs de traction en courant ondulé. La commande du tracteur se fait en continu avec un dispositif automatique de limitation du courant de démarrage. Il faut encore remarquer la bonne adhérence, appréciée particulièrement en service de manœuvre, obtenue par une commande continue de l'effort de traction, et une forte diminution de l'usure des balais de charbon.

Locomotive de manœuvre des Chemins de fer fédéraux suisses avec convertisseurs à thyristors pour marche et freinage par récupération

La locomotive de manœuvre à trois essieux de la série Ee 3/3 II peut être utilisée avec les deux systèmes de courant, 15 kV–16 $^{2}/_{3}$ Hz et 25 kV–50 Hz (fig. 14). L'équipement de traction monomoteur a une puissance unihoraire de 700 ch. Pour obtenir un facteur de puissance favorable en marche et un effort de freinage suffisant en freinage par récupération, on a utilisé le principe d'un montage en série et en opposition d'un pont à diodes et d'un pont à thyristors entièrement commandé. Le désir de rendre le service, lors de manœuvres, aussi simple que possible, a conduit à un manipulateur commun pour la marche et le freinage, dans lequel l'appareillage électronique assure l'affichage en continu de l'effort de traction avec régulation pour le maintenir à une valeur constante ainsi que l'ajustage et la régulation de l'effort de freinage. La régulation de l'effort de freinage comprend pratiquement tout le domaine des vitesses et le frein à récupération n'est relayé par le frein à air comprimé qu'immédiatement avant l'arrêt. Un réglage en continu de l'effort de traction, un service aisé et une adhérence favorable sont les caractéristiques appréciées de cette locomotive.

Cet exposé permet de saisir l'importance que prend de plus en plus l'électronique appliquée aux véhicules moteurs ferroviaires. La technique électronique de commande développée par la Société Brown Boveri, depuis que les premiers appareils ont fait leurs preuves, est complétée maintenant et trouve de nouvelles applications grâce à l'électronique de puissance.

(A. G.)

HANS-JOACHIM HAHN

Sur la coordination de l'isolement dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension

621.315.051.024
621.316.93:621.3.048

Dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension, avec thyristors comme redresseurs, il est nécessaire, pour des raisons économiques, de maintenir le niveau de protection aussi bas que possible. Cette exigence peut être pleinement remplie par des parafoudres. L'adaptation de la tension nominale du parafoudre à ces conditions peut, cependant, s'avérer difficile. L'article présent traite des différents aspects de ce problème. Comme les thyristors peuvent être sensibles aux variations rapides de la tension, la contrainte qu'ils subissent, lors de l'apparition de surtensions d'origine atmosphérique à front raide, arrivant dans le poste par la ligne aérienne, est étudiée en détail.

Exposé du problème

Le but de la coordination de l'isolement dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension est le même que dans les installations pour le transport d'énergie par courant alternatif, à savoir: utiliser une isolation aussi réduite que possible avec un risque de défaillance raisonnable. Alors que, dans le transport d'énergie par courant alternatif, une marge de sécurité relativement grande est encore usuelle entre la tension de tenue et le niveau de protection (qui est souvent due plutôt aux habitudes que motivée par des raisons économiques), elle n'est plus possible dans les installations de transmission par courant continu, surtout dans le cas des redresseurs à thyristors, si l'on ne veut pas que le coût des installations atteigne un niveau prohibitif. En outre, du point de vue de la technique de la protection, des considérations techniques nouvelles sont nécessaires. Ceci concerne, pour ne citer qu'un exemple en rapport avec les surtensions d'origine atmosphérique, l'influence de l'inductance de lissage au début de la ligne, qui ne peut ordinairement – malgré les apparences habituelles – être considérée comme élément arrêtant les surtensions et par suite diminuant grandement les contraintes de tension correspondantes, auxquelles sont soumises des parties d'installation du poste de transmission d'énergie par courant continu à haute tension et particulièrement des branches de pont.

Pour fixer la tension nominale des parafoudres, il faut considérer les variations de tension de différents types lors de changements des conditions de service et/ou de perturbations. A cet effet, il faut examiner avec prudence quelles sont les perturbations qui pourraient apparaître simultanément et exclure les combinaisons de perturbations de faible probabilité d'apparition; car, plus la tension nominale du parafoudre peut être choisie basse, plus bas est aussi le niveau de protection. Il résulte de ces réflexions la question pressante suivante: comment peut-on fixer la tension nominale des parafoudres de façon bien limitée et claire dans leur application aux installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension?

Choix de la tension nominale des parafoudres dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension

La forme de la tension de service, pour laquelle le parafoudre doit s'éteindre, dépend fortement du lieu de montage du parafoudre. Elle dépend de plus des conditions de service du moment. Dans les transports d'énergie par courant alternatif, où les parafoudres sont connectés entre chaque phase et la terre, la tension nominale du parafoudre est déterminée par la tension maximale pouvant apparaître entre une phase et la terre. Le rapport de cette tension à la tension maximale de service du réseau s'appelle le coefficient de mise à la terre. Les tensions apparaissant, lors des états anormaux du réseau tels que défauts à la terre et/ou délestages brusques, entre les phases saines et la terre peuvent donc être caractérisées par le coefficient de mise à la terre. De la même façon, on peut également caractériser, dans les installations de transmission par courant continu à haute tension, les tensions stationnaires ou quasi-stationnaires entre les bornes des parafoudres pour diverses conditions de service et différents cas de perturbation. Quelques-uns de ces facteurs, réunis dans le tableau de la page 346, seront indiqués et éclaircis brièvement dans ce qui suit.

Facteur pour «chute de tension interne», f_i

Une installation de redresseur en montage en pont (fig. 2) possède, du côté tension continue, une tension dépendant de l'angle de retard, du courant

continu et de la tension de court-circuit. A vide et à angle de retard nul, la tension continue croît (tension continue idéale); dans les installations de transmission par courant continu à haute tension, sa valeur se situe, en moyenne, de 15 %, au-dessus de la tension continue nominale. C'est pourquoi, à l'intérieur d'une installation de redresseur, on choisit la tension nominale du parafoudre supérieure à la tension continue nominale, d'un facteur f_i.

Facteur pour tenir compte de l'indice de pulsation, f_p

Il caractérise l'ondulation de la tension continue à vide. Le rapport de la crête de la tension redressée ondulée à la tension continue idéale à vide est exprimé par f_p. On peut poser $f_p = 1{,}05$ pour un indice de pulsation $p = 6$, et $f_p = 1{,}02$ pour $p = 12$.

Facteur de délestage, f_L

Les montées de tension brusques aux barres omnibus à courant alternatif peuvent également être exprimées par un facteur, appelé ici facteur de délestage. Les augmentations de tension se transmettent au côté soupapes du transformateur de redresseur, et comme un réglage instantané de la tension n'est pas toujours possible, il faut s'attendre à une augmentation de tension d'environ 10 %, spécialement lors des délestages brusques.

Facteur d'amplitude de tension transitoire de rétablissement, f_u

A l'intérieur de l'installation de redresseur, au moment du blocage des courants inverses, des oscillations de tension apparaissent brusquement et se superposent aux tensions étoilées. Elles dépendent des mesures prises pour leur amortissement (voir l'exemple de la figure 1). Leur valeur maximale, rapportée à la valeur de crête de la tension composée du transformateur du côté des soupapes, est supposée égale à 1,25 dans le tableau. Le facteur d'amplitude de tension transitoire de rétablissement f_u est, comparé aux facteurs mentionnés ci-dessus, relativement grand. Il est par conséquent particulièrement important: plus ce facteur est petit, plus la tension nominale des parafoudres est basse et plus bas est aussi le niveau de protection.

Les facteurs mentionnés peuvent légèrement varier selon la conception de l'installation. Les valeurs indiquées dans le tableau sont données à titre indicatif. Si l'on tient compte des facteurs ci-dessus, on obtient la valeur maximale, rapportée à la tension continue nominale, de la tension quasi-stationnaire, en formant le produit des différents facteurs. Alors que les facteurs f_u, f_L, f_i, f_p dépendant seulement de l'installation de redresseur et de son

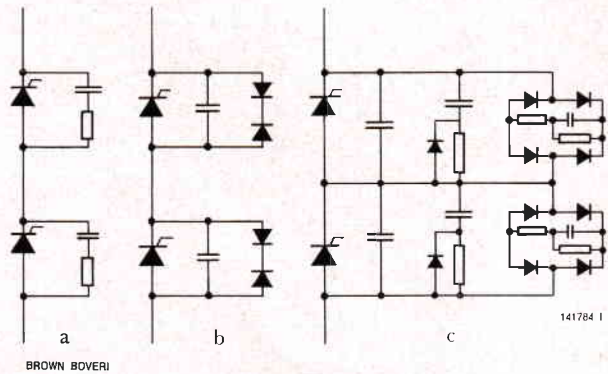


Fig. 1. – Circuits d'amortissement pour thyristors

a: avec circuit *RC* pour chaque soupape
b: avec condensateur et diodes à avalanche contrôlée pour chaque soupape
c: avec condensateur, circuit *RC* modifié et pont auxiliaire d'amortissement

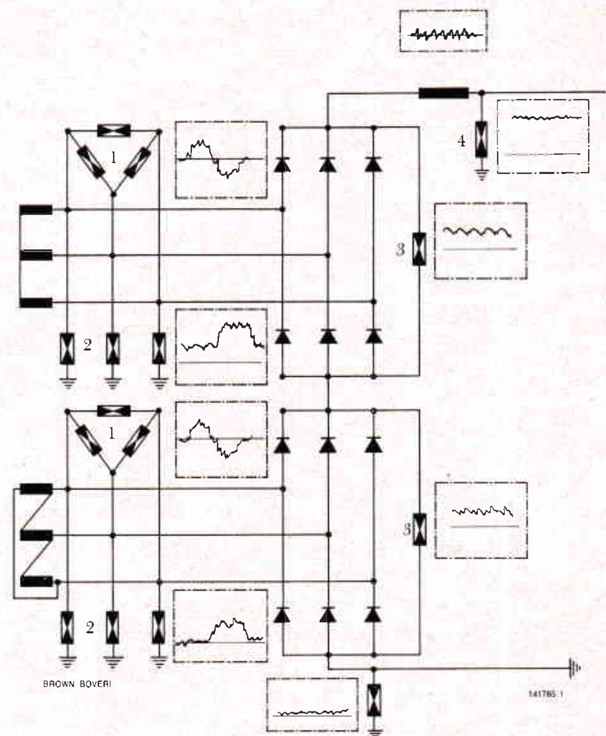


Fig. 2. – Parafoudres dans une installation de transmission d'énergie par courant continu à haute tension avec deux ponts par pôle

1 à 4: emplacements des parafoudres selon le tableau. Les explications sont données dans le texte.

Rapports entre les tensions nominales des parafoudres et la tension continue nominale dans une installation de transmission d'énergie par courant continu à haute tension avec b ponts par pôle

	Lieu de montage de parafoudres Les chiffres se rapportent aux indications de la figure 2	Forme de la tension de service pour laquelle le parafoudre doit s'éteindre	Facteur pour la chute de tension interne f_i	Facteur pour tenir compte de l'indice de pulsation f_p	Facteur de délestage f_L	Facteur d'amplitude de tension transitoire de rétablissement f_u	Pointes de tension apparaissant en service, rapportées à la tension continue nominale $\frac{\hat{u}}{U_{dn}} = f_p \cdot f_u \cdot f_L \cdot f_i$	Facteur pour tenir compte de la forme de tension s'écartant de la sinusoïde pure et de la tension continue f_f	Tension nominale du parafoudre rapportée à la tension continue nominale	Niveau de protection, rapporté à la tension continue nominale
1	entre les phases du transformateur de redresseur, côté soupapes		1,15	1,05	1,1	1,25	$\frac{1}{b} \cdot 1{,}66$	1,05	*AC** $\frac{1}{b} \frac{\hat{u}}{U_{dn}} \cdot f_f \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{b} \cdot 1{,}23$	$\frac{1}{b} \cdot 2{,}6$
2	entre chaque phase et la terre du transformateur de redresseur, groupe de soupapes interne		1,15	1,05	1,1	1,25	$\frac{1}{b} \cdot 1{,}66$	0,8	*DC+* $\frac{1}{b} \frac{\hat{u}}{U_{dn}} \cdot f_f = \frac{1}{b} \cdot 1{,}33$	$\frac{1}{b} \cdot 2{,}4$
2′	comme précédemment, mais groupe de soupapes externe		1,15	1,02	1,1	1,125	1,45	0,8	*DC* $\frac{\hat{u}}{U_{dn}} \cdot f_f = 1{,}16$	2,1
3	aux bornes du pont redresseur		1,15	1,05	1,1	1,1	$\frac{1}{b} \cdot 1{,}45$	0,95	*DC* $\frac{1}{b} \frac{\hat{u}}{U_{dn}} \cdot f_f = \frac{1}{b} \cdot 1{,}39$	$\frac{1}{b} \cdot 2{,}5$
4	entre chaque pôle et la terre		1,0	1,0	1,1	1,0	1,10	1,0	*DC* $\frac{\hat{u}}{U_{dn}} \cdot f_f = 1{,}1$	1,95

DC+: parafoudres pour courant continu   *AC**: parafoudres pour courant alternatif

régime de fonctionnement, le facteur de forme f_f, mentionné en outre dans le tableau, ne dépend que du parafoudre. Il exprime la caractéristique d'extinction et de rétablissement de la tension de tenue du parafoudre pour une forme de tension qui s'écarte de la forme sinusoïdale pure ou d'une tension continue idéale et est valable pour les parafoudres tels qu'ils sont utilisés par la Communauté d'études dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension[1].

Pour les parafoudres qui sont montés entre les phases du transformateur de redresseur, côté soupapes, le facteur de forme est égal à 1,05 dans le tableau. On l'a choisi supérieur à 1 dans l'hypothèse que les oscillations de commutation superposées à la tension alternative rendent les conditions d'extinction difficiles. Pour tous les autres parafoudres, mentionnés dans le tableau, ce facteur est égal ou inférieur à 1. Les valeurs inférieures à 1 signifient que, pour la forme de tension de service, les conditions d'extinction sont plus favorables que pour une tension continue pure ayant une amplitude égale à la valeur des pointes de tension maximales pouvant apparaître en service.

La tension nominale du parafoudre, rapportée à la tension continue nominale de l'installation de transmission par courant continu à haute tension, est donnée par le produit de tous les facteurs mentionnés (l'avant-dernière colonne du tableau). Comme il est d'usage, avec les parafoudres à courant alternatif, d'exprimer la tension nominale (tension d'extinction) par sa valeur efficace, il faut encore multiplier la valeur rapportée des parafoudres à courant alternatif par $1/\sqrt{2}$.

Le niveau de protection N_p, que l'on peut atteindre, est un multiple de la tension nominale déterminé par le type du parafoudre. Si l'on désigne, par $\frac{N_p}{U_a} = \hat{u}_p$, le rapport du niveau de protection N_p à la tension nominale U_a du parafoudre, on peut écrire le niveau de protection, rapporté à la tension continue nominale U_{dn} à la sortie du poste, sous la forme:

$$\frac{N_p}{U_{dn}} = \frac{m}{b} \cdot \hat{u}_p \cdot f_i \cdot f_p \cdot f_L \cdot f_u \cdot f_f$$

Les symboles, utilisés dans l'expression ci-dessus et expliqués en détail dans le texte, signifient brièvement:

N_p = niveau de protection (val. de crête, en kV)
U_{dn} = tension continue nominale à la sortie du poste
m = nombre ordinal, compté à partir du point milieu; le nombre ordinal du dernier pont est $m = b$
b = nombre de ponts
$\hat{u}_p = \frac{N_p}{U_a}$ = niveau de protection rapporté à la tension nominale U_a du parafoudre
f_f = facteur tenant compte de la forme de tension
f_i = facteur pour chute de tension interne
f_p = facteur tenant compte de l'indice de pulsation
f_L = facteur de délestage
f_u = facteur d'amplitude de tension transitoire de rétablissement

Pour les parafoudres branchés aux bornes de chaque pont et entre les phases du transformateur de redresseur, côté soupapes, on a $m = 1$ et, pour les parafoudres branchés entre chaque phase et la terre, m est égal au nombre ordinal des ponts, compté à partir du point milieu.

Avec les parafoudres modernes pour installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension [1][2], on obtient un niveau de protection, rapporté à la valeur de crête de la tension nominale, de $\hat{u}_{p\sim} \approx 2{,}2/\sqrt{2}$ pour parafoudres à courant alternatif, et $\hat{u}_{p-} \approx 1{,}8$ pour parafoudres à courant continu.

Le *niveau de tenue* doit, pour des raisons de sécurité, être choisi supérieur au niveau de protection offert par les parafoudres. Pour le rapport de protection (rapport du niveau de tenue au niveau de protection), les recommandations de la CEI [2] sur la coordination de l'isolement en haute tension donnent la valeur 1,2. Les réflexions de surtensions transitoires sur la partie de conducteur comprise entre les parafoudres et l'objet à protéger font que celui-ci peut être soumis à des surtensions supérieures au niveau de protection. On peut maintenir ces surtensions basses en montant les parafoudres aussi près que possible de l'objet à protéger et en évitant les coups de foudre proches par des fils de garde. De plus, comme il est indiqué dans le paragraphe suivant, une surtension transitoire arrivant par la ligne aérienne est aplatie lors de son entrée dans l'installation de transmission d'énergie par courant continu à haute tension, et par suite l'élévation de la tension est diminuée. Il s'ensuit de plus qu'il serait peu sensé de tenir compte aussi de la tension d'amorçage au choc des parafoudres pour ondes de choc à front raide (raideur du front selon la CEI 1200 kV/µs environ) dans la coordination de l'isolement à

[1] En rapport avec l'importance croissante que prend la transmission d'énergie par courant continu à haute tension dans différents problèmes de transport d'énergie, les firmes AEG, BBC et Siemens travaillent en commun pour le développement et la mise au point des installations et des appareils nécessaires dans ce domaine.

[2] Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 351.

l'intérieur d'une installation de transmission d'énergie par courant continu à haute tension.

Les niveaux de protection rapportés, selon le tableau de la page 346, ont été obtenus par des recherches portant sur des pointes de tension stationnaire ou quasi stationnaire. Faut-il tenir compte également de cas de perturbation possible, apparaissant simultanément? Cela est dans une large mesure une question d'appréciation. Mais comme dans une installation de transmission par courant continu à haute tension, avec ponts à thyristors, un bas niveau de protection est très économique, on a plutôt tendance à risquer la perte d'un parafoudre lors de l'apparition simultanée de différentes perturbations, et ceci d'autant plus que le coût des parafoudres est relativement peu élevé. Pour des raisons identiques, un défaut à la terre à l'intérieur du poste de transmission par courant continu à haute tension n'est pas inclus dans les considérations qui précèdent. Comme nous l'avons déjà dit, les surtensions d'origine atmosphérique, qui arrivent par la ligne aérienne, sont aplaties. Mais comme les thyristors peuvent être sensibles [3] aux variations de tension rapides, il est nécessaire de connaître la raideur du front d'une onde incidente à l'intérieur de l'installation de redresseurs.

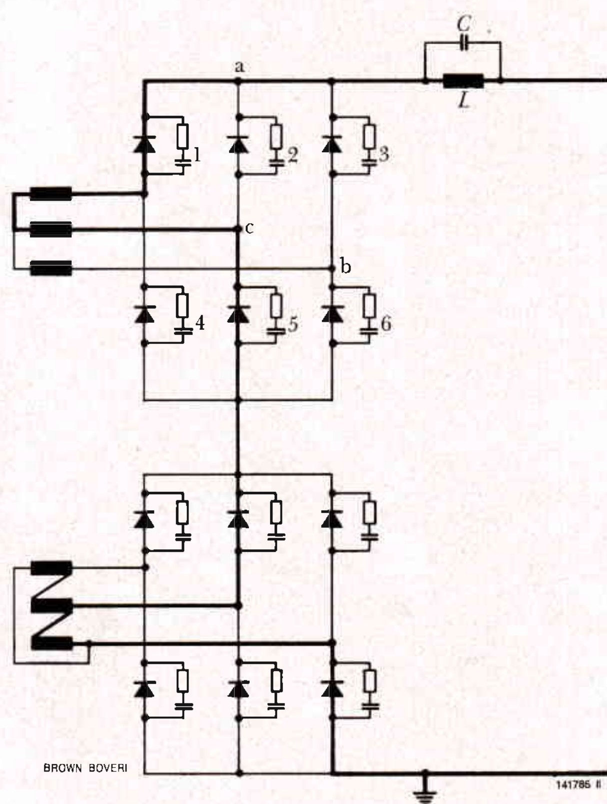


Fig. 3. – Schéma pour l'étude des surtensions d'origine atmosphérique arrivant par la ligne aérienne, avec deux ponts par phase

En trait épais: courant quasi stationnaire dans le pont lors de l'arrivée de la surtension.

L = inductance de la bobine de lissage

C = capacité entre l'entrée et la sortie de la bobine intervenant lors de l'apparition des ondes de choc

Les éléments RC, 1 à 6, en parallèle avec les branches de pont, sont des éléments équivalents et doivent être calculés dans chaque cas concret (selon le montage de la figure 1).

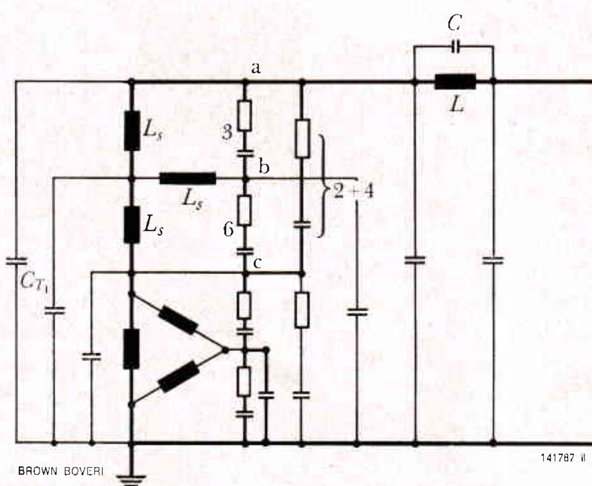
Ondes de tension à front raide arrivant par les lignes aériennes

Pour continuer notre étude, nous considérons un poste de redresseurs selon la figure 3 et nous supposons que les différents thyristors ou groupes de thyristors sont équipés d'éléments RC, ou d'éléments RC modifiés et de ponts auxiliaires pour amortir les oscillations de commutation, à peu près comme l'indique la figure 1a ou 1b. Dans le cas des éléments d'amortissement, selon la figure 1c, ces considérations ne sont valables que si l'onde incidente a, par rapport à la terre, la même polarité que la charge du condensateur fournie par le pont auxiliaire. Elles sont approximativement valables aussi pour un montage selon la figure 1b, mais jusqu'au moment où la tension d'amorçage de la diode à avalanche contrôlée est atteinte. D'autre part, nous supposons que les redresseurs sont des soupapes idéales, qui ne présentent aucune résistance dans le sens de conduction, et que l'onde de surtension arrive lorsque le courant quasi stationnaire suit le trajet indiqué par une ligne épaisse sur la figure 3. La figure 4 donne le schéma du circuit équivalent pour les phénomènes de choc, ce circuit est obtenu en considérant la capacité concentrée du transformateur et des inductances par rapport à la terre, selon la figure 3, et est valable dans le cadre des limitations mentionnées ci-dessus. Les éléments L_s représentent les inductances de fuite des phases du transformateur et les éléments RC des figures 3 et 4, les éléments équivalents déterminés par les circuits d'amortissement des différents thyristors ou groupes de thyristors. On voit que le circuit équivalent de la figure 4 peut beaucoup être simplifié au premier moment et pour les ondes de tension à front raide. C'est pourquoi il est de nouveau représenté à la figure 5A, où les éléments, pouvant en première approximation être négligés pour la suite de notre étude, sont indiqués par des traits interrompus.

A l'aide des valeurs, données ci-dessous à titre indicatif, valables pour une transmission sous 400 kV avec une puissance par pont de 400 MW, le lecteur

Fig. 4. – Schéma équivalent pour les phénomènes de choc – déduit de la figure 3 –, tenant compte des capacités de la bobine de lissage et des enroulements de transformateur intervenant lors de l'apparition des ondes de choc

En trait épais:	schéma équivalent du circuit principal, L_s = inductances de fuite des enroulements de transformateur.
En trait d'épaisseur moyenne:	schéma équivalent des éléments d'amortissement pour les thyristors, rapporté à la branche de pont. Les nombres marquant les éléments *RC* sont ceux de la figure 3. Pour plus amples détails, voir le texte.
En trait mince:	Capacités des enroulements intervenant lors de l'apparition des ondes de choc.
a, b, c:	Symboles pour d'autres simplifications, voir la figure 5.



peut facilement voir que les éléments indiqués en traits interrompus peuvent être négligés.

$L \approx 0{,}6$ H
$C \approx 3 \cdot 10^{-9}$ F
$L_s \approx 35 \cdot 10^{-3}$ H
$C_{T_1} = C_{T_2} \approx 2 \cdot 10^{-9}$ F
$C_{T_3} \approx 6 \cdot 10^{-9}$ F
$C_{III} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ F
$R_I \approx 1{,}5 \cdot 10^3$ Ω
$R_{II} \approx 0{,}75 \cdot 10^3$ Ω
$C_I \approx 13 \cdot 10^{-9}$ F
$C_{II} \approx 26 \cdot 10^{-9}$ F

Le schéma équivalent simplifié de la figure 5A est de nouveau indiqué par la figure 5B sous une forme réduite. Les transformations indiquées par les figures 5C et 5D permettent de simplifier encore les calculs.

A l'aide de la formule reproduite dans l'annexe, on peut calculer les variations de la tension aux branches de pont les plus exposées (branches de pont 2 et 4 dans le figure 3), dans le cas d'une onde de tension, arrivant par la ligne aérienne avec un front, à accroissement linéaire, d'une raideur k. La figure 6 montre la courbe de tension calculée pour k = 1000 kV/μs. Des raideurs plus élevées ne sont pas très probables, si la ligne aérienne est protégée contre les coups de foudre directs par des fils de garde. La raideur initiale sur les branches de pont exposées – comme on peut le voir facilement sur les figures 5A à D – diminue dans un rapport $\frac{C}{C + C_1}$ par rapport à la raideur de l'onde incidente. Pour les nombres indiqués, on obtient une raideur initiale aux branches de pont les plus exposées de 375 kV/μs.

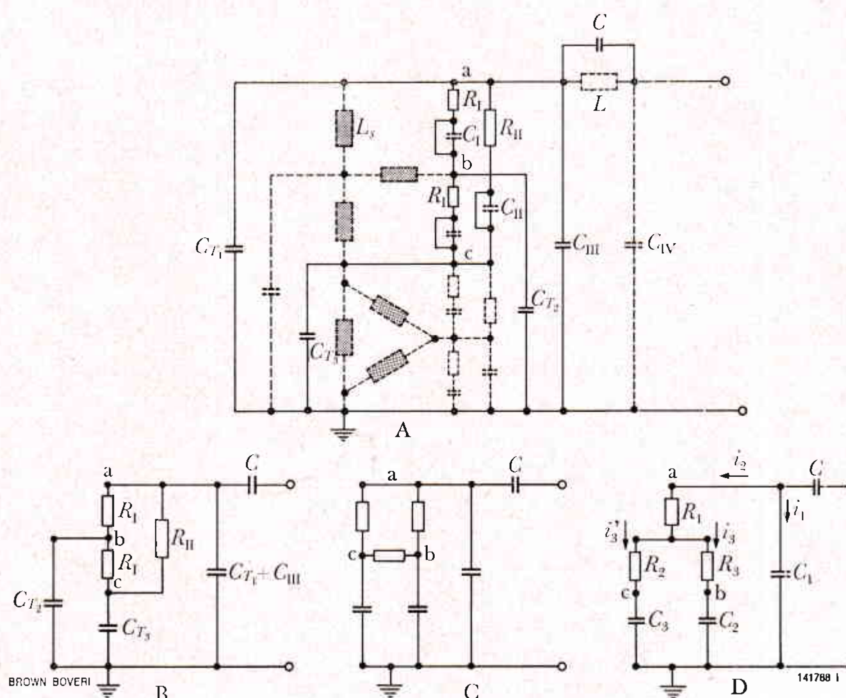


Fig. 5. – A: Schéma équivalent comme à la figure 4. Les éléments en trait interrompu peuvent être négligés pendant les premières microsecondes lorsqu'on envisage des ondes à front très raides

Les montages des figures 5B à 5D montrent les transformations successives en vue de simplifier le calcul. L'onde de choc entre a et c du schéma équivalent de la figure 5D apparaît aux bornes des branches de pont 2 et 4 de la figure 3. Pour plus amples détails voir le texte.

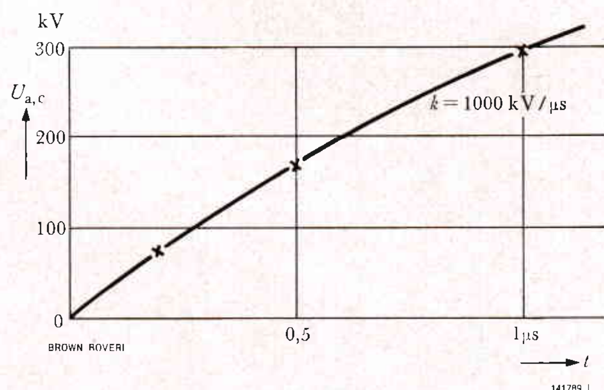


Fig. 6. – Courbe calculée de la tension aux bornes des branches de pont exposées (fig. 3, branches de pont 2 et 4) pour une onde de choc arrivant par la ligne aérienne et ayant une raideur de front de 1000 kV/µs

Ceci peut mettre en danger les thyristors. Même si, grâce à l'amélioration continuelle des thyristors, la raideur de tension admissible augmente beaucoup, les résultats de l'étude montrent que:

- l'inductance de lissage ne peut, par suite de sa capacité série inhérente, aucunement être considérée comme élément pouvant empêcher les surtensions d'origine atmosphérique d'entrer dans le poste,
- et en ce qui consiste la réduction de la raideur de front, on devrait choisir la capacité série des inductances de lissage aussi petite que possible et les capacités par rapport à la terre des inductances, y compris la capacité d'entrée du pôle de pont, aussi élevées que possible.

Conclusions

Il résulte des réflexions présentes qu'il devrait être possible, également dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension, de déterminer, d'une façon relativement simple, la tension nominale des parafoudres à partir de la tension continue nominale à la sortie du poste. En raison du grand intérêt économique que présente le maintien du niveau de protection aussi bas que possible, il faut choisir la tension nominale du parafoudre aussi basse que possible. Mais le risque d'une défaillance de l'extinction ne doit pas être trop grand. Comme la caractéristique d'extinction d'un parafoudre dans les installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension dépend plus fortement de la conception du parafoudre que dans le cas d'un parafoudre usuel à courant alternatif et qu'il faut tenir compte des propriétés particulières de ces installations, une coopération étroite entre le constructeur d'installations et le fabricant de parafoudres est nécessaire. Les parafoudres, mis au point par la Communauté d'étude pour installations de transmission d'énergie par courant continu à haute tension, permettent de répondre largement aux exigences en vue d'étudier des installations économiques avec faibles risques de défaillance en exploitation.

Appendice

Avec les symboles de la figure 5D, page 349, et en admettant que l'onde de choc croît linéairement avec une raideur k (kVs^{-1}), on peut écrire les transformées de Laplace sous la forme:

$$\frac{i_1}{pC_1} = i_2 R_1 + i_3\left(R_3 + \frac{1}{pC_2}\right)$$

$$i_3\left(R_3 + \frac{1}{pC_2}\right) = (i_2 - i_3)\left(R_2 + \frac{1}{pC_3}\right)$$

$$i_1\left(\frac{1}{pC_1} + \frac{1}{pC}\right) + \frac{i_2}{pC} = \frac{k}{p^2}$$

On peut calculer le courant i_3 à partir de ces trois équations. En revenant à l'original, on trouve:

$$i_3 = \frac{kCC_2}{h}\left(\frac{1}{a-b}\left[C_3 R_2\left(e^{at} - e^{bt}\right) + \frac{e^{at}}{a} - \frac{e^{bt}}{b}\right] + \frac{1}{ab}\right)$$

Comme les expressions désignées par a, b et h ne varient pas lorsqu'on remplace i_3 par i_3', R_3 par R_2 et C_2 par C_3, par superposition on peut, sans calculs supplémentaires, écrire directement la somme des tensions aux bornes de R_1 et de R_2, qui correspond à la tension aux bornes des branches de pont soumises aux plus fortes contraintes (points a, c, dans la figure 5D).

$$u_{a,c} = \frac{kC}{h}\left(f_1 C_2 C_3\left[R_1\left(R_2 + R_3\right) + R_2 R_3\right] + \right.$$
$$\left. + f_2\left[R_1\left(C_2 + C_3\right) + R_2 C_3\right]\right)$$

avec

$$f_1 = \frac{e^{at} - e^{bt}}{a-b}$$

$$f_2 = \frac{1}{a-b}\left(\frac{e^{at}}{a} - \frac{e^{bt}}{b}\right) + \frac{1}{ab}$$

$$a = \frac{-l + \sqrt{l^2 - 4hm}}{2h}$$

$$b = \frac{-l - \sqrt{l^2 - 4hm}}{2h}$$

$$h = (C + C_1)(C_2 C_3 [R_2 R_3 + R_1 (R_3 + R_2)])$$

$$l = [C + C_1][C_3 R_2 + C_2 R_3 + R_1 (C_2 + C_3)] + + C_2 C_3 (R_2 + R_3)$$

$$m = C + C_1 + C_2 + C_3$$

En comprenant la figure 5A à la figure 5D et en utilisant les formules connues pour la transformation de schémas en triangle en schémas en étoile, on obtient, à partir des valeurs de références mentionnées plus haut:

$C = 3$ nF	$R_1 = 300\ \Omega$
$C_1 = 5$ nF	$R_2 = 300\ \Omega$
$C_2 = 2$ nF	$R_3 = 600\ \Omega$
$C_3 = 6$ nF	

La courbe de la tension, reproduite à la figure 6, a été calculée à l'aide de ces valeurs et de la formule donnée plus haut.

(A. G.)

EWALD SARBACH

Bibliographie

[1] W. HEISE, E. SARBACH, R. POVH: Isolationskoordination in HGÜ-Anlagen. *Elektrotech. Z.*, éd. A., vol. 89 (1968), n° 9, p. 204 à 208.

[2] Recommandations pour la coordination de l'isolement, Guide d'application. Publication CEI 71A, première éd., Genève 1962.

[3] E. ANWANDER: Le caractère de tension du thyristor. *Rev. Brown Boveri*, t. 53 (1966), n° 10, p. 607 à 625.

Contribution à la normalisation des essais portant sur les couches de pollution des isolateurs à haute tension

621.315.62.001.4

Comme contribution aux discussions concernant l'établissement de recommandations pour l'essai des isolateurs pollués artificiellement, l'auteur expose quelques-uns des résultats des essais qui sont, depuis longtemps, effectués dans notre laboratoire d'essais à haute tension.

Le pouvoir isolant des isolateurs à haute tension pollués prend une importance croissante à cause de la pollution de l'air qui ne cesse d'augmenter. On voudrait prévoir, à l'aide d'essais de laboratoire, le comportement ultérieur des isolateurs, et connaître l'effet des différents paramètres, importants pour la détermination de la forme (distance d'isolement, diamètres des ailettes et du corps, ligne de fuite, etc.). Mais, à cause de facteurs d'influence divers et de types de pollution en service différents, il n'est pas facile d'établir des règles générales sur les conditions à respecter dans les essais de pollution en laboratoire. Depuis longtemps, la Société Brown Boveri procède à des essais sur des isolateurs artificiellement pollués; nous allons exposer quelques-uns des résultats obtenus, dans ce qui suit.

Les méthodes d'essai

Pour produire des couches conductrices électrolytiques sur des isolateurs, deux méthodes ont pris de l'importance. Pour simuler les conditions régnant surtout au bord de la mer, on a développé la méthode du brouillard salin [1, 2][1]. Dans ce procédé, l'isolateur propre est soumis à un brouillard d'eau salée de conductivité ajustable. Le pouvoir isolant est caractérisé par la salinité que l'isolateur soumis à la tension de service maximale peut encore supporter. Dans nos propres essais, exécutés de cette façon, nous n'avons éprouvé aucune difficulté dans l'application de cette méthode [3].

Pour simuler les pollutions industrielles, les isolateurs sont de préférence recouverts d'une couche de matériaux solides, insolubles ou solubles avec formation d'ions; la couche est ensuite humidifiée.

Comme matériaux solides, on utilise souvent la cellulose, le kaolin, le ciment, la bentonite ou le kieselguhr[2]. En nous appuyant sur les recommandations du VDE [4], nous effectuons nos essais sur les couches de pollution, depuis plus de dix ans, surtout avec des solutions colloïdales de kieselguhr, de composition suivante:

eau distillée: 1 litre
matériau solide (kieselguhr): 100 g
aérosile (précédemment, 15 g de dextrine): 10 g
sel de cuisine

[1] Nombre entre crochets, voir la bibliographie, p. 358.

[2] Le kieselguhr est formé de particules microscopiques, formées par les squelettes de diatomées en SiO_2; à cause de sa fine structure poreuse, il absorbe beaucoup d'eau (plus de cinq fois son volume).

La conductivité $\varkappa_v$ de la solution colloïdale est déterminée par la quantité du sel: $\varkappa_v = 1500$ µS/cm à 1200 µS/cm. L'aérosile (SiO_2 fabriqué artificiellement et formé de particules très fines) empêche la couche de dégoutter. A cet effet, nous avons précédemment utilisé de la dextrine, l'isolateur devait être alors réchauffé. La solution colloïdale est pulvérisée par un pistolet et se dépose sur la surface de l'isolateur en une mince couche régulière. La conductivité de la solution, l'épaisseur de la couche déposée et l'humidité absorbée déterminent la conductivité finale[3] $\varkappa_s$ (µS) et par suite aussi le degré de pollution. L'objet est mouillé par de l'eau distillée finement atomisée et la résistance superficielle R est mesurée sous une tension continue ou alternative de 1000 V lorsque la couche est entièrement humidifiée. Nous n'avons jamais utilisé la méthode d'humidification, utilisée dans certains laboratoires et qui consiste à introduire dans une atmosphère humide l'objet étudié fortement refroidi; en effet, elle n'a pas donné de résultats satisfaisants.

[3] Conductance d'une surface carrée de la couche déposée, saturée d'humidité: $\varkappa_s = f \cdot 1/R$, avec f = facteur de forme [4].

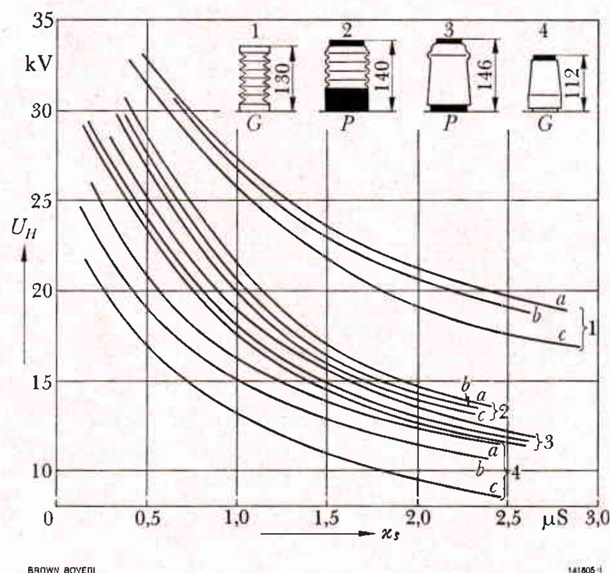


Fig. 1. – Caractéristiques de tenue de tension d'isolateurs supports à 12 kV, pour différentes compositions de couche

$\varkappa_v$ = conductivité de la solution
$\varkappa_s$ = conductivité de la couche
U_H = tension de tenue
a = kieselguhr $\varkappa_v$ = 950 µS/cm
b = ciment $\varkappa_v$ = 3400 µS/cm
c = poussières industrielles $\varkappa_v$ = 3520 µS/cm
G = résine synthétique
P = porcelaine

La tension d'essai, réglée préalablement, est appliquée à l'isolateur ainsi préparé et est maintenue constante pendant l'essai, jusqu'à l'apparition d'un contournement, ou jusqu'à ce qu'aucun contournement ne soit plus à attendre («Méthode sans humidification pendant l'essai de tension»); les couches peu dégradées sont souvent soumises à plusieurs essais. Les essais sont effectués avec des conductivités comprises entre quelques µS et 40 à 60 µS (limite supérieure).

La figure 6 montre comment on obtient, à partir des valeurs mesurées, la «caractéristique de tension de tenue» qui sépare le domaine, où aucun contournement n'apparaît, du domaine où des contournements peuvent apparaître.

D'après une proposition plus récente, la couche doit être humidifiée dans un brouillard artificiel en 15 min; ce n'est qu'alors, le brouillard gardant la même intensité, qu'on doit appliquer la tension d'essai et la maintenir pendant 15 min, pour autant qu'aucun contournement n'apparaisse plus tôt («Méthode avec humidification pendant l'essai de tension»).

A l'aide de résultats d'essais, nous allons maintenant indiquer l'importance de quelques grandeurs d'influence importantes dans la méthode des couches déposées.

L'influence de la composition de la couche

Dans une série d'essais, nous avons déterminé la caractéristique de tension de tenue de supports isolants à 12 kV avec des couches de kieselguhr, de ciment ou de «poussière industrielle» (100 parties de cendres volantes, 33 parties de ciment, 0,62 parties de noir de fumée). Dans le domaine des petites conductivités de couche, nous n'avons obtenu aucune différence appréciable des tensions de tenue (fig. 1). L'ordre, dans lequel se sont rangés les quatre objets, est resté inchangé et indépendant du genre du matériau solide utilisé. Cependant, indépendamment du matériau de l'isolateur (nous avons essayé des supports en résine synthétique moulée et en porcelaine), les caractéristiques relatives à la poussière industrielle employée se trouvaient le plus bas (fig. 1 et 2), et pour les conductivités de couche élevées, elles se trouvaient même beaucoup plus bas. Probablement, le carbone contenu dans la couche déposée favorise la formation et la migration de petits arcs limités. On pouvait même parfois déceler sur la surface des objets en résine synthétique moulée, à base de phénol, des traces de brûlure dues aux décharges superficielles, traces qui réduisaient forte-

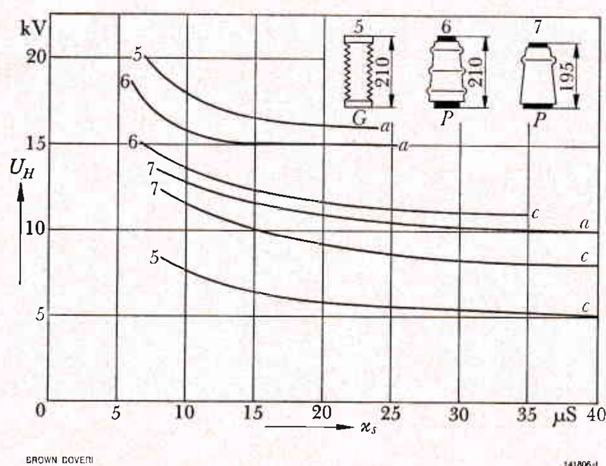


Fig. 2. – Caractéristiques de tension de tenue d'isolateurs supports à 24 kV, avec des couches de kieselguhr et de poussières industrielles

$\varkappa_v$ = conductivité de la solution colloïdale
$\varkappa_s$ = conductivité de la couche
U_H = tension de tenue
a = kieselguhr $\varkappa_v = 5450$ µS/cm
c = poussières industrielles $\varkappa_v = 4080$ µS/cm
G = résine synthétique moulée
P = porcelaine

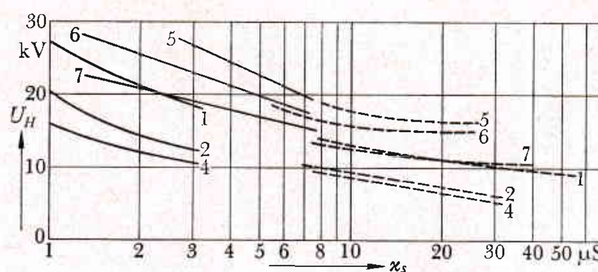


Fig. 3. – Caractéristiques de tension de tenue d'isolateurs supports à 12 et à 24 kV (la forme d'isolateur, voir fig. 1 et 2) avec des couches de kieselguhr de conductivités différentes

——— : $\varkappa_v$ = 150 µS/cm | Isolateurs à 24 kV,
– – – – : $\varkappa_v$ = 5450 µS/cm | n° 5, 6, 7
——— : $\varkappa_v$ = 950 µS/cm | Isolateurs à 12 kV,
– – – – : $\varkappa_v$ = 2550 µS/cm | n° 1, 2, 4

ment la tension de tenue (fig. 2, isolateur 5). Par contre, comme d'autres essais l'ont montré, les nouvelles résines cyclo-aliphatiques ont un comportement de beaucoup meilleur.

Dans une autre série d'essais, nous avons étudié l'influence de la conductivité de la solution colloïdale sur la tension de tenue avec les mêmes supports isolants (fig. 3). L'allure des caractéristiques et par suite l'ordre des objets étaient pratiquement indépendants de la conductivité de la solution dans tout le domaine de conductivité étudié.

Deux types d'isolateur, à savoir les isolateurs 1 et 2 de la figure 1, furent de plus essayés avec des couches de pollution naturelle, en position verticale, et les résultats furent comparés aux résultats obtenus avec des couches de kieselguhr uniformes. Les isolateurs étaient exposés à la pollution en position horizontale et en position verticale, sur une plate-forme d'extérieur couverte d'un toit et située près d'une cimenterie. Les isolateurs montés en position horizontale étaient recouverts, sur leur partie supérieure, d'une couche d'épaisseur quasi uniforme, tandis que le dépôt sur les isolateurs montés en position verticale avaient une épaisseur non uniforme à cause des ailettes et des rainures.

Tension de tenue d'isolateurs supports à 12 kV avec couches de ciment déposées par pollution naturelle et couches de kieselguhr artificielles (les tensions de tenue sont déduites de la figure 3)

Isolateur support	n° 1		n° 2			
Couche de pollution	$\varkappa_s$	U_H	$\varkappa_s$	U_H	$\varkappa_s$	U_H
Couche de kieselguhr uniforme	32,5 µS	10,4 kV	24 µS	7 kV		
Couche de ciment naturelle: isolateur en position verticale	32,5 µS	11 kV	24 µS	8 kV		
Couche de kieselguhr uniforme	42,5 µS	9,7 kV	7 µS	10,2 kV	25 µS	6,9 kV
Couche de ciment naturelle: isolateur en position horizontale	42,5 µS	9,4 kV	7 µS	10 kV	25 µS	6,2 kV

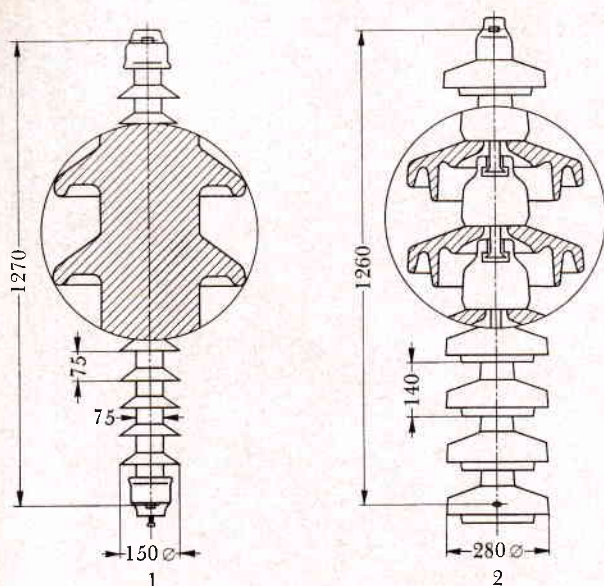


Fig. 4 – 1: Isolateur à long fût, type VKL 75/14

14 ailettes
ligne de fuite: 1850 mm
facteur de forme: 6,45

Fig. 4 – 2: Chaîne d'isolateurs capot et tige antibrouillard, du type 9 Bullers T 9336

avec 9 isolateurs capot et tige
ligne de fuite: 3850 mm
facteur de forme: 7,1

Les valeurs mesurées sur des isolateurs avec couches de pollution naturelle étaient en bon accord avec celles qui étaient obtenues avec des couches de kieselguhr déposées artificiellement (voir le tableau). Les tensions de tenue de tous les isolateurs exposés à la pollution en position verticale (couche d'épaisseur non uniforme) étaient supérieures aux tensions de tenue obtenues avec le kieselguhr; tandis que celles des isolateurs disposés horizontalement (couche uniforme) étaient légèrement inférieures à ces dernières.

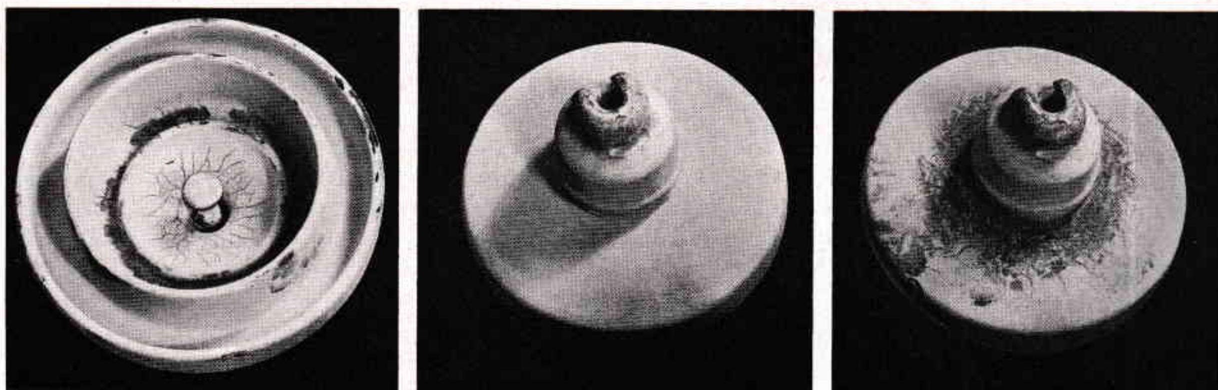
On a pu constater que l'ordre, dans lequel se rangeaient les tensions de tenue, obtenu avec des couches de kieselguhr était tout à fait comparable avec celui des autres genres de pollution. Il en est de même des résultats de mesure avec conductivités différentes de la solution colloïdale. Cependant, les caractéristiques de la tension de tenue des autres compositions de couche peuvent se trouver encore plus bas que celles qu'on obtient avec des couches de kieselguhr. Les résultats de mesure sur des isolateurs pollués naturellement confirment la validité de la méthode utilisant le kieselguhr.

L'influence de la méthode d'essai (type d'humidification)

Il est facile de montrer que l'humidification d'une couche sous tension conduit à une tension de tenue plus élevée que dans le cas du procédé décrit plus haut. C'est pourquoi, pour simuler de près le cas le plus défavorable, on applique la tension d'essai immédiatement à la couche déjà saturée d'eau. Ceci correspond au cas rare, mais cependant possible, de la mise sous tension d'une installation d'extérieur à haute tension lors de brouillards et de bruines. On peut également penser à continuer l'humidification après l'application de la tension d'essai. Toutefois, le temps nécessaire pour effectuer cet essai serait plus long.

Deux isolateurs de ligne aérienne typiques furent essayés de cette manière, c'est-à-dire en continuant l'humidification après l'application de la tension: un isolateur à long fût du type VKL 75/14, convenant aux régions où les dépôts de corps conducteurs sont faibles, et une chaîne d'isolateurs de même longueur constituée de neuf isolateurs capot et tige antibrouillard, du type Bullers T 9336 (fig. 4). Pour la formation du brouillard, nous utilisons sept buses disposées les unes au-dessus des autres à une distance de 200 mm, l'eau étant pulvérisée par de l'air comprimé. Le dispositif correspond aux recommandations d'une proposition soumise aux discussions internationales [2].

Dans le cas de l'isolateur à long fût, la totalité de la surface de l'isolateur se laissait uniformément et entièrement humidifier; tandis que dans le cas de l'isolateur capot et tige, cela n'était réalisé que pour la surface supérieure des jupes, la surface inférieure de celles-ci n'étant qu'incomplètement humectée. Pour obtenir une humectation uniforme, il a fallu procéder, à cause de la forme fermée, à une humidification manuelle, surtout dans la zone comprise entre la troisième ondulation et le capot, avant l'application de la tension d'essai. Dans le cas de l'isolateur capot et tige, la tension d'essai déterminait une destruction de la couche, comprise entre la troisième ondulation et le capot, plus forte que dans le cas de l'isolateur à long fût, la cause en étant la grande densité de courant dans cette zone. Dans la «méthode avec humidification pendant l'essai de tension», la

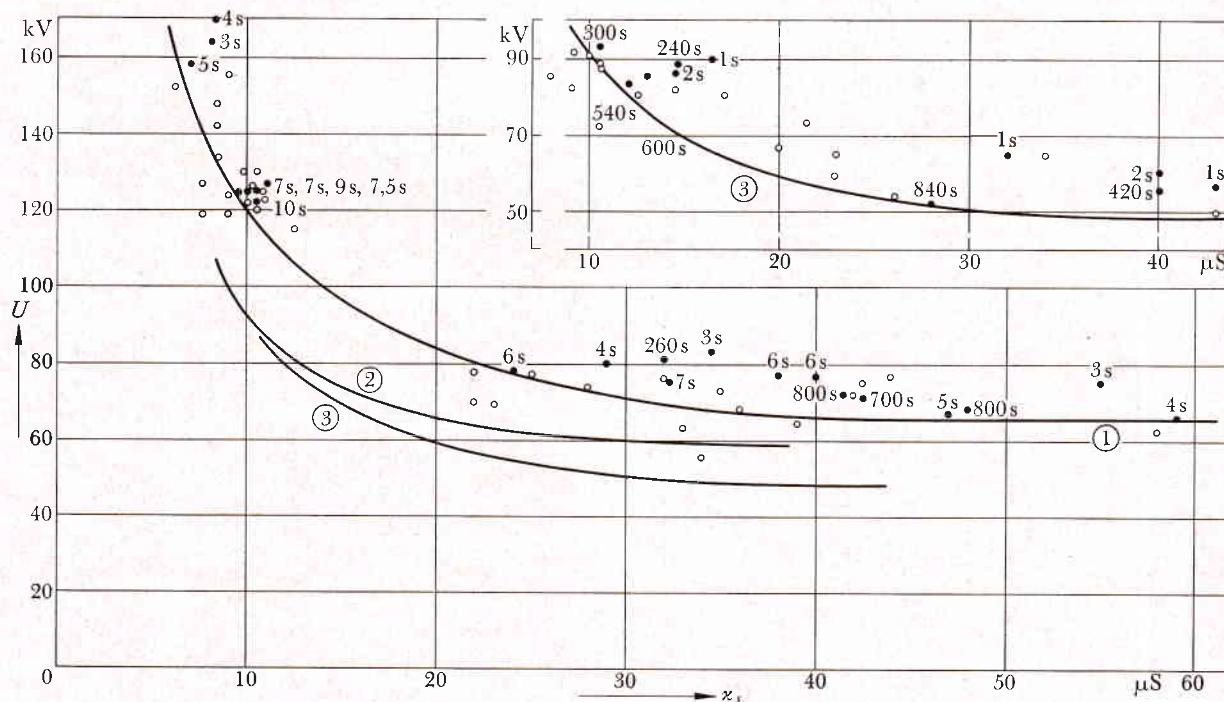


BROWN BOVERI 142511-I

Fig. 5. – Les éléments d'une chaîne à 9 isolateurs capot et tige, du type Bullers T 9336, après quatre essais dans le domaine de la tension de tenue, conductivité de la couche au début de l'essai: $\varkappa_s = 40\ \mu S$

couche est soumise à une contrainte beaucoup plus élevée à cause d'une plus longue durée d'essai et de l'humidification supplémentaire, et ceci d'autant plus que la conductivité de la couche est plus élevée. Les contraintes de tension dues à des décharges superficielles, ayant lieu, au plus tard, 3 à 5 s après l'application de la tension, ont un effet destructeur moindre sur la couche. Les degrés d'endommagement possibles de la couche sont indiqués sur la figure 5.

Les différentes valeurs mesurées à l'aide de la



BROWN BOVERI 141809-I

Fig. 6. – Caractéristiques de tension de tenue de la chaîne d'isolateurs capot et tige, du type 9 Bullers T 9336, et de l'isolateur à long fût, du type VKL 75/14, obtenues à l'aide des méthodes «avec» et «sans» humidification sous tension

○ = aucun contournement
● = contournement
1 à 840 s = temps de claquage

① = 9 Bullers T 9336: «avec humidification sous tension»
② = 1 VKL 75/14: «sans humidification sous tension»
③ = 1 VKL 75/14: «avec humidification sous tension»

Les différents points relevés pour les courbes ① et ③ sont indiqués.

«méthode avec humidification pendant l'essai» sont représentées sur la figure 6. Les tensions de décharge superficielle sont également données; elles sont accompagnées des temps de claquage (intervalles de temps compris entre le moment de l'application de la tension et l'instant où apparaît la première décharge superficielle). Il est sûr que pendant les premières 30 secondes, l'humidification pendant l'essai n'influe pas sur la tension à laquelle apparaissent les décharges superficielles. Comme la caractéristique ① (fig. 6) est déterminée par des valeurs mesurées avec des temps de claquage inférieurs à 30 s, elle est valable pour des essais aussi bien avec que sans humidification de la couche sous tension, et ceci malgré que des temps de claquage de 4 s à presque 14 min aient été constatés dans le domaine des conductivités élevées. Pour la «méthode sans humidification pendant l'essai», les temps de claquage maximaux sont de l'ordre de 30 s.

Pour l'isolation à long fût (courbes 2 et 3 de la figure 6), aucune différence n'a été décelée entre les deux méthodes dans le domaine des conductivités petites et moyennes, malgré des temps de claquage de 1 s à 10 min. Dans un cas, avec une grande conductivité et humidification sous tension, nous avons mesuré, pour un temps de claquage exceptionnellement long de 14 min, une diminution de la tension de tenue de 13 %. Ceci pourrait être attribué à la forme extrêmement ouverte de cet isolateur qui facilite l'entrée du brouillard. Dans le cas d'un isolateur à long fût de même forme, mais avec une distance entre ailettes plus petite (55 mm, et 75 mm dans l'isolateur du type VKL 75/14), l'humectation sous tension n'avait aucun effet.

Si l'on tient compte de la grande dispersion des résultats de mesure sur couches de pollution, il semble que la diminution de 13 %, observée une seule fois, ne peut pas justifier le temps de claquage long lié à l'humidification sous tension. Pour éviter les dispositifs d'essai trop compliqués et les grosses pertes de temps, il vaudrait mieux ne pas recourir à l'humidification sous tension.

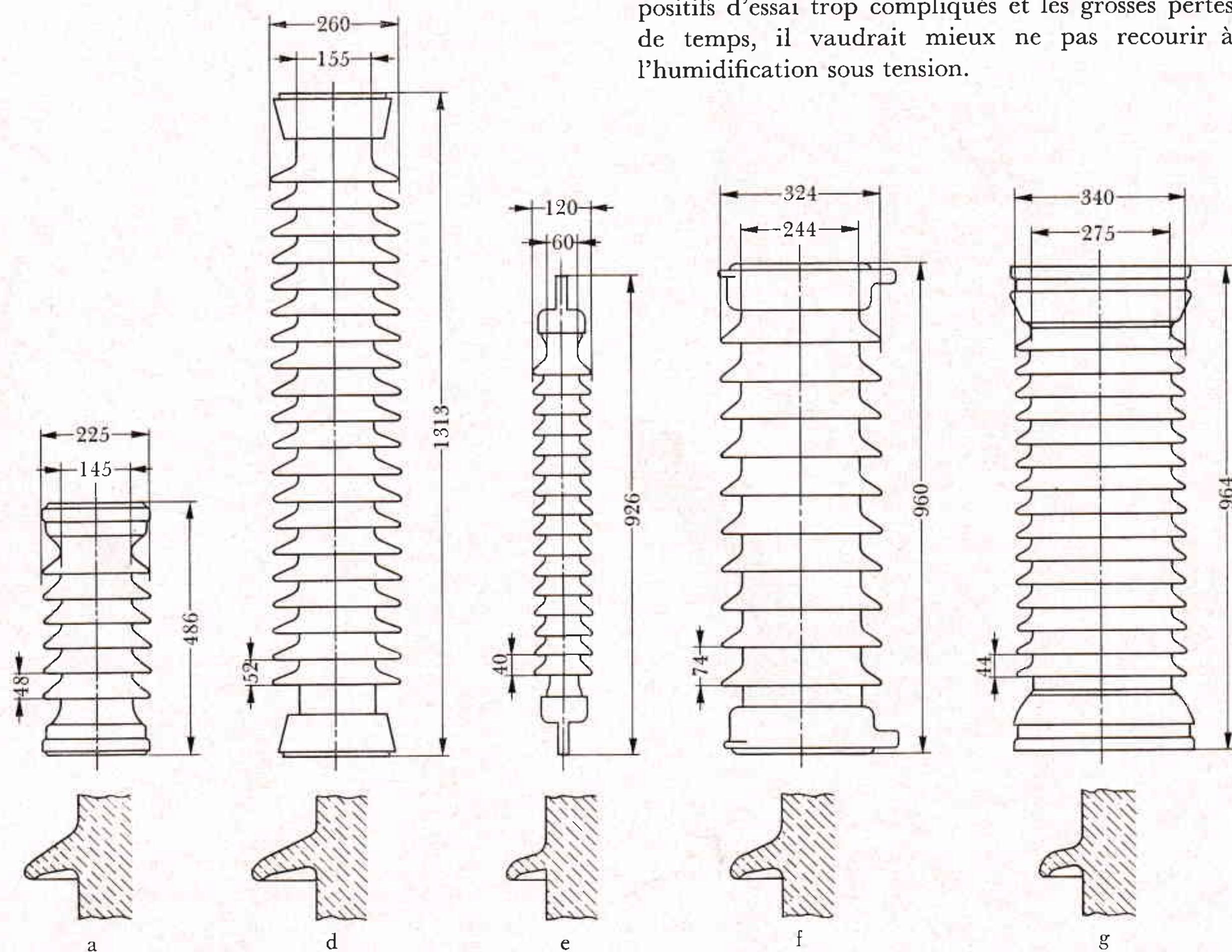


Fig. 7. – Isolateurs d'appareils

Les isolateurs b, c, non indiqués, ne diffèrent de a que par le nombre de leurs ailettes.

Isolateur b: 13 ailettes; ligne de fuite: 1600 mm Isolateur c: 19 ailettes; ligne de fuite: 2280 mm

Mesures comparatives sur isolateurs d'appareils

Nous allons montrer l'importance des essais comparatifs à l'aide de mesures effectuées sur des isolateurs d'appareils pollués artificiellement.

Dans une première série d'essais, la comparaison a porté sur des isolateurs ayant la même forme d'ailette, mais avec des nombres d'ailettes différents (isolateurs a à c, voir la figure 7), et sur l'isolateur d, ayant la même forme d'ailette que c, mais avec une hauteur de 10 % plus grande et une ligne de fuite de 28 % plus longue. Les résultats sont les suivants: pour une même forme d'ailette, la tension de tenue ne croît pas linéairement avec la ligne de fuite ou le nombre d'ailettes (fig. 9). Ce fait est le plus clairement mis en évidence avec les conductivités modérées ($\varkappa_s = 10$ μS). Si l'on rapporte la tension de tenue à la ligne de fuite (fig. 8, B), l'ordre de la caractéristique s'inverse: la tension de tenue moyenne d'une ligne de fuite de 1 cm est nettement plus élevée dans le cas de l'isolateur a, à six ailettes, que dans le cas des isolateurs à 13, 19 et 20 ailettes.

En outre, la comparaison a porté sur des isolateurs de hauteurs d'isolement presque identiques et de formes d'ailette semblables, mais de diamètres d'ailettes et de corps différents (fig. 8, A). La courbe relative à l'isolateur e, ayant le plus petit diamètre, se trouve bien au-dessus de l'étroite bande de dispersion de tous les autres objets comparables b, f, g, la courbe de l'isolateur g, avec le plus gros diamètre, se situant le plus bas; ceci est également vrai pour la caractéristique de tension de tenue spécifique (fig. 8, B). La cause en devrait être attribuée au fait que la résistance constituée par la couche déposée humide non court-circuitée, qui se trouve en série avec les décharges partielles, a une grande influence sur la tension de contournement; mais, cette résistance dépend de l'inverse du diamètre du corps. Il faut cependant remarquer la faible différence dans les tensions de tenue des isolateurs b, f et g.

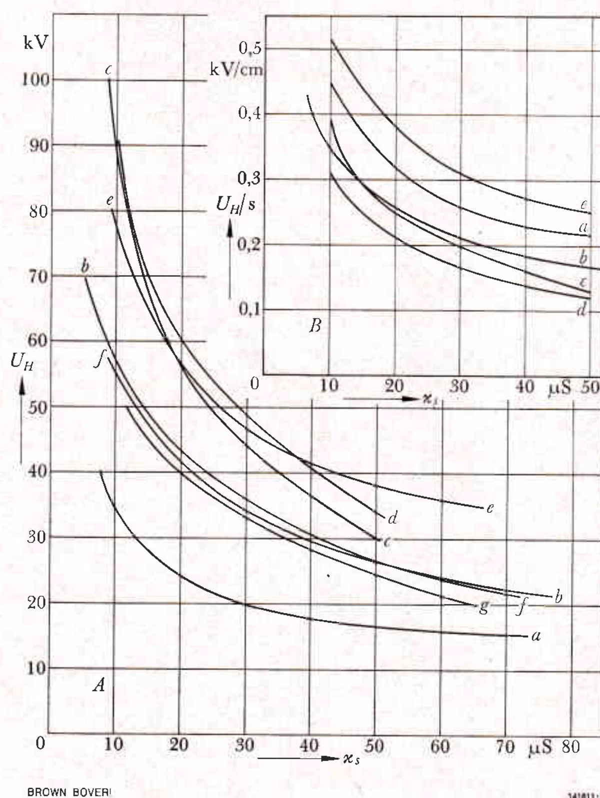


Fig. 8. – Tension de tenue U_H et tension de tenue rapportée à la ligne de fuite s d'isolateurs d'appareils, en fonction de la conductivité $\varkappa_s$ de la couche de kieselguhr

Conductivité de la solution colloïdale: $\varkappa_v = 2500$ μS/cm

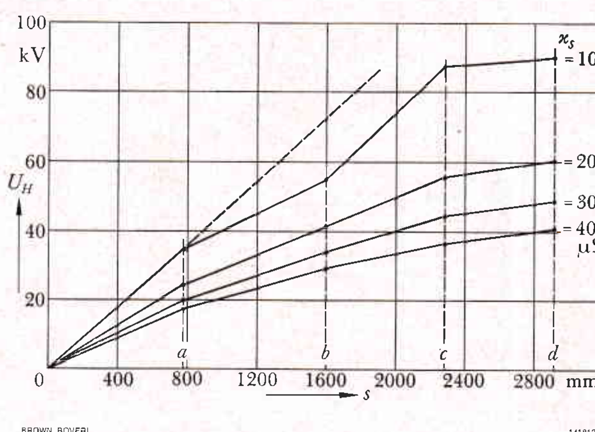


Fig. 9. – Tension de tenue des isolateurs a, b, c et d en fonction de la ligne de fuite s et de la conductivité de couche $\varkappa_s$ (valeurs prises à la figure 8)

Conclusion

Le but des essais de laboratoire est de comparer les formes d'isolateur existantes et de les classer. Un autre objectif des essais de pollution, moins important, consiste non seulement à déterminer des valeurs relatives, mais encore à procéder à des déterminations de nature absolue sur le degré de pollution naturelle, pouvant conduire à des contournements. A l'étape finale des travaux de mise au point, l'isolateur recevrait ainsi la forme optimale.

De grands progrès ont été réalisés dans la mise au point de méthodes d'essai appropriées. L'essai des isolateurs avec des couches de kieselguhr, comme il vient d'être décrit, permet d'établir une comparaison,

relativement simple et sûre, entre les différentes formes d'isolateurs pour une même tension nominale. Le dérangement, dû à la poussière de la solution, lors de la pulvérisation de la solution colloïdale fut grandement réduit par l'emploi de l'aérosile à la place de la dextrine, et le temps mis à l'élaboration de la couche réduit de moitié environ, aucun préchauffage n'étant plus nécessaire. Si l'on fait abstraction du coûteux circuit d'alimentation à haute tension – coûteux, parce que le courant de court-circuit sur l'objet pourrait atteindre 10 A –, l'exécution des essais ne demande aucun dispositif spécial, ce qu'on peut considérer comme étant particulièrement avantageux. Des essais comparatifs avec des couches de compositions différentes ont donné le même ordre des tensions de tenue. La conductivité de la solution et l'épaisseur de la couche n'ont aucune grande influence. Les caractéristiques plus importantes des couches de pollution naturelle peuvent être simulées par la méthode de kieselguhr. Les essais comparatifs, au cours desquels l'humidification de la couche est poursuivie après l'application de la tension, n'ont révélé aucune raison valable pour qu'on adopte cette méthode de loin la plus exigeante. La comparaison des résultats d'essais de laboratoire et des résultats obtenus en exploitation montre que, dans certains cas, les essais de laboratoire ne peuvent pas tenir compte de tous les facteurs importants pour le comportement en service.

(A. G.)

TILLO WEINMANN

Bibliographie

[1] C.H.A. ELY, P.J. LAMBETH: Artificial-pollution test for high-voltage outdoor insulators. Proc. IEE 111 (1964), n° 5, p. 991 à 998.

[2] G.H. GILLAM: Rapport sur les travaux du comité d'études, n° 5 (isolateurs). Rapport C.I.G.R.E., n° 212, Paris 1966.

[3] W. LATAL, W. SCHMIDT: Comportement des parafoudres lors d'une pollution artificielle. *Rev. Brown Boveri*, t. 55 (1968), n° 4/5, p. 182 à 187.

[4] VDE 0448/1.68: Vorläufige Richtlinien für die Untersuchung von Freiluft-Isolatoren für Anlagen mit Wechselspannungen über 1 kV unter Fremdschichteinfluss.

Réflexions sur un système de surveillance centralisée de réseaux

621.316.9:621.311.1:681.31

Les auteurs exposent les principes d'un système de surveillance de réseaux qui a la tâche d'éviter les effondrements de réseaux, les baisses de tension, les coupures de l'énergie et de réduire au minimum l'importance des perturbations de réseaux. A cet effet, ils proposent l'utilisation d'un calculateur qui, pour chaque état des charges, recherche continûment, par voie de calcul, les effets des perturbations et qui détermine et mémorise les mesures appropriées pouvant être rapidement appliquées lors de l'apparition réelle de perturbations. Ils indiquent en même temps un indice de sécurité qui fournit des informations sur l'état du réseau et l'importance des suites d'une perturbation.

Introduction

Les graves suites des perturbations, pouvant apparaître dans les réseaux de transport d'énergie électrique, posent la question de savoir si celles-ci ne pourraient pas être évitées ou tout au moins réduites à un niveau supportable, par l'utilisation convenable de dispositifs de surveillance. Bien que les dispositifs de protection classiques des lignes, des transformateurs et des alternateurs agissent en ce sens, leur tâche se limite cependant à isoler l'élément défaillant. Les effets du déclenchement de ces dispositifs sur la totalité du réseau ne sont pas pris en considération. Il peut s'ensuivre que la mise hors service d'une ligne, due à un court-circuit, entraîne la surcharge d'une ligne de transport voisine, qui est à son tour mise hors service après un certain temps par le fonctionnement d'un relais thermique, ce qui finalement peut conduire à un effondrement accéléré du réseau.

A l'aide des méthodes analytiques, utilisées dans l'établissement des projets de réseaux pour le calcul du transit de l'énergie et de la stabilité, il est possible d'éviter en grande partie de telles perturbations par l'emploi d'un calculateur numérique travaillant directement sur le réseau. Ceci n'est possible que si l'on parvient à trouver, à l'aide du calculateur, le remède aux défauts et surcharges possibles et à l'appliquer lors de l'apparition réelle de perturbations, par une action automatique de l'appareil sur le réseau.

Le fonctionnement d'un tel calculateur (par exemple, un calculateur numérique moderne avec les organes périphériques correspondants) peut être, lors de l'élimination d'une surcharge d'un élément de transport d'énergie, imaginé tel que celui-ci calcule plusieurs répartitions des charges et recherche celle qui n'entraîne aucune surcharge de la ligne concernée. L'appareil effectue donc une recherche pour déterminer de nouvelles répartitions appropriées des charges. On suppose bien entendu que le calculateur reçoit en permanence des informations sur l'état du réseau et de la consommation. Les dispositifs de protection classiques restent en service, et le système de surveillance envisagé lui est superposé. Un tel dispositif peut non seulement assurer la surveillance d'un réseau quant aux surcharges et au décrochage d'alternateurs, mais également celle des effets de courts-circuits et de défauts à la terre [1][1].

Possibilité d'une surveillance de réseau Hypothèses

Pour la surveillance centralisée, on considère une zone délimitée du réseau surveillé, qui est dans le cas le plus simple un réseau isolé, mais qui peut être aussi une partie d'un système d'interconnexion plus grand. On inclut dans le système de surveillance autant

[1] Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 364.

d'échelons de tensions que la sécurité du réseau l'exige. Ensuite, on suppose que toutes les puissances actives et réactives prises ou injectées aux nœuds, ainsi qu'un certain nombre de tensions de nœud et la position de tous les disjoncteurs sont transmis au poste central de surveillance par un système de téléaction. On suppose d'autre part que les caractéristiques du réseau et les limites de charge sont mémorisées dans le calculateur. Pour le fonctionnement entièrement automatique, il est également nécessaire que l'envoi des ordres au réseau, au moyen du système de téléaction, soit automatisé.

Exposé du problème

Dans le cas présent, le système de surveillance est limité à la détection de la défaillance d'éléments de transport et des surcharges qui en résulteraient éventuellement pour les autres éléments de transport, ainsi qu'à l'élimination de l'état perturbé correspondant.

En cas de défaillance d'un élément de transport, en vertu du changement de position des disjoncteurs et des autres informations introduites dans le calculateur, celui-ci peut donc, par un calcul du transit des charges [2, 3], déterminer la nouvelle répartition des charges et, par suite, aussi les surcharges éventuelles des autres éléments et les baisses de tension inadmissibles. Par conséquent, la surveillance concerne les amplitudes de courant et de tension dans les éléments de transport d'énergie et dans les nœuds.

Un état de réseau, où il existe une surcharge ou une baisse de tension inadmissible, qu'elles résultent d'une manœuvre de couplage ou non, doit être désigné comme état perturbé. Au contraire, l'état non perturbé est l'état de réseau en régime stationnaire sans aucun défaut, qui peut ainsi persister sans l'intervention de dispositifs de protection.

L'application de la surveillance centralisée n'a de sens que si l'état perturbé du réseau peut persister un certain temps et s'il ne conduit pas immédiatement à un effondrement accéléré du réseau. Ce temps doit être mis à profit pour déterminer et appliquer les remèdes nécessaires. Il est d'ailleurs acceptable en pratique, car l'échauffement maximal admissible n'est atteint qu'après l'écoulement d'un certain temps, au bout duquel l'élément de transport doit être obligatoirement mis hors service.

Maintenant, il faut voir quels sont les moyens dont on dispose pour éliminer une surcharge et éviter des baisses de tension. A cet effet, on peut citer:

- mise en service et hors service d'éléments de transport
- variation des puissances réactives injectées
- variation des puissances actives injectées
- délestage

Il faut ajouter comme conditions secondaires le fait que les puissances absorbées par des consommateurs doivent être couvertes entièrement ou avec une réduction aussi faible que possible et le fait que le changement de la répartition des charges n'entraîne aucune nouvelle surcharge. Le délestage ne doit être considéré que dans les cas extrêmement critiques.

C'est la tâche du calculateur de déterminer et d'appliquer le remède ou une combinaison des mesures ci-dessus citées pour faire passer le réseau de l'état perturbé dans celui non perturbé, dans l'intervalle de temps mentionné. De plus, il est souhaitable de connaître à tout moment les mesures nécessaires à prendre pour assurer l'alimentation du réseau. A cet effet, le calculateur doit fournir un indice de sécurité défini d'une façon appropriée.

Emploi du calculateur

Dans la recherche d'un moyen pour remédier à l'état perturbé du réseau, il est nécessaire d'envisager plusieurs répartitions des charges et de vérifier les surcharges et les baisses de tension éventuelles. En général, on peut trouver plusieurs solutions satisfaisantes. La première exigence dans l'emploi d'un calculateur doit consister à pouvoir conduire le processus de recherche de telle sorte que l'on n'effectue qu'un nombre restreint de calculs sur le transit des charges. A cette fin, les premières indications sur l'utilité d'un moyen d'intervention doivent être déduites du genre de perturbation, de la position de l'élément de transport surchargé, de la structure topologique de la partie de réseau environnant le défaut et des possibilités de transfert des charges. Il s'agit là de recherches logiques et d'opérations arithmétiques simples qui demandent un temps de calcul plus court en comparaison du calcul proprement dit du transit des charges. C'est seulement lorsque les indications sont positives que le calcul propre-

ment dit du transit des charges peut être effectué et l'utilité d'un remède confirmée. Les détails sur le genre de ces recherches et essais seront donnés plus loin.

Même si l'on conduit le processus de recherche de cette façon, il peut arriver qu'il soit nécessaire de calculer plusieurs répartitions des charges pour un cas de perturbation. Si l'on dispose, comme il a été mentionné, d'un temps assez court pour la détermination d'un moyen d'intervention, il est peu rationnel, du point de vue de l'emploi économique du calculateur, de ne commencer le processus qu'une fois que la perturbation a lieu. Car, on devrait utiliser des calculateurs très rapides, dans lesquels, le programme de surveillance du réseau ne travaillerait que lors de quelques cas de perturbation.

Toutefois, pendant le reste du temps, le calculateur ne serait pas utilisé. Afin d'éviter ceci, on fait la proposition suivante: l'installation de surveillance recherche, déjà dans l'état non perturbé, continûment les effets de défaillances d'éléments de transport et les surcharges, en supposant un défaut dans chaque élément et sa mise hors service.

Pour les perturbations envisagées, l'appareil de surveillance détermine la mesure à prendre et la mémorise sous forme codée. Lors de l'apparition réelle d'une perturbation, il ne reste plus qu'à décoder le mot mémorisé et appliquer la mesure, ce qui peut se faire en un temps très court. Comme un réseau de transport se trouve en état non perturbé au moins les 99 % du temps de service, le temps disponible pour le processus de recherche et les calculs du transit des charges est largement suffisant. Cependant, il s'y ajoute, comme restriction, le fait que les mesures à prendre doivent constamment être adaptées à l'état des charges, de sorte que le cycle de détermination de ces mesures pour les perturbations envisagées doit se terminer en 10 à 30 minutes environ. Eu égard à la variation journalière normale de la charge d'un réseau, c'est une durée qui est acceptable. Une certaine prévision peut encore être faite à l'aide de la vitesse de variation des charges, de sorte que la mesure à prendre, déterminée quelque temps plus tôt et mémorisée, correspond bien aux conditions de charge du moment.

Recherches préalables et indications

Le véritable calcul du transit des charges doit être précédé d'une série de recherches et d'essais qui doit indiquer si le moyen considéré peut ou ne peut pas être utilisé. Si un changement de puissance injectée à un nœud s'avère nécessaire, il faut obtenir aussi une première indication sur la valeur de la variation de puissance qui ne donnerait lieu à aucune surcharge et n'entraînerait pas de baisse de tension. Ces recherches et contrôles, qui consistent en comparaisons et en opérations arithmétiques simples, vont être maintenant décrits en détail. Rappelons que l'on suppose que les limites de courant et de tension ont été mémorisées pour chaque élément de transport et chaque nœud. L'état perturbé est donc caractérisé par le dépassement de ces limites établies au préalable, ce qui ne signifie toutefois pas que le dispositif de protection locale de l'élément concerné doive fonctionner. Il faut d'abord effectuer quelques recherches fondamentales. A cet effet, nous nous reportons à la figure 1 qui représente une partie de réseau comprenant un élément de transport surchargé. Cet élément est situé entre les nœuds N_1 et N_2. Au nœud N_1 est injectée la puissance S_1, tandis que l'on prend au nœud N_2 la puissance S_2. Les flèches indiquent le sens de transit de la puissance active.

On obtient les premières informations sur les mesures à prendre possibles par les considérations suivantes:

A 1: On suppose que le réseau est divisé par une ligne qui coupe l'élément de transport surchargé. La ligne doit diviser le réseau en deux régions, ou bien elle doit être fermée. Pour la partie de réseau représentée sur la figure 1, cette ligne est constituée par le cercle qui entoure le nœud N_1. Si la somme des courants maximaux des éléments de transport coupés par cette ligne est supérieure à la somme des courants actifs traversant cette ligne, il est alors, en principe, possible d'éliminer une surcharge par une variation de la répartition des charges. Si la somme des courants maximaux est plus petite, la charge doit être réduite lorsque aucun autre élément de transport n'est plus disponible.

A 2: Si, lors de l'étude de l'élément de transport, le courant actif sortant est plus grand que le courant maximal, aucune réduction de surcharge n'est possible par le changement de la charge réactive.

A 3: S'il n'existe à l'intérieur de la ligne fermée mentionnée qu'une seule alimentation ou charge, la surcharge ne peut, malgré que le critère A 1 est satisfait, être éliminée que par la réduction

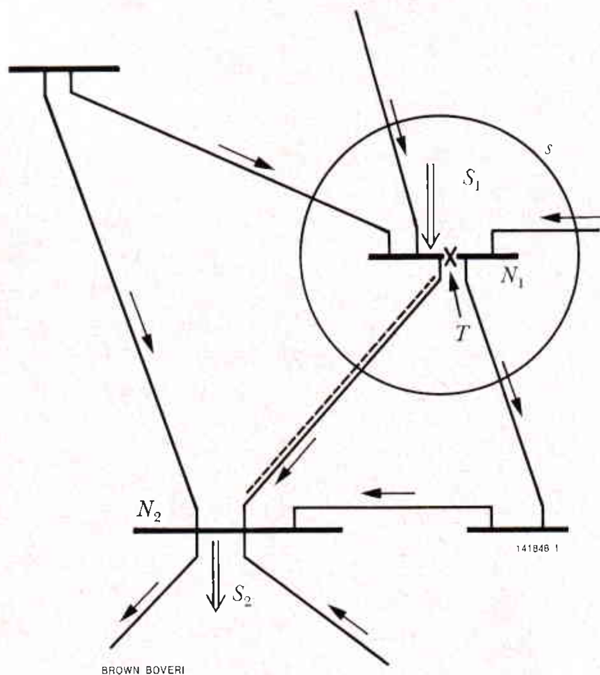


Fig. 1. – Partie de réseau avec un élément de transport surchargé

N_1, N_2 = nœuds du réseau
S_1, S_2 = respectivement puissances reçue et fournie
s = ligne de séparation
T = point de sectionnement sur la barre omnibus; des alternateurs doivent être connectés à droite et à gauche de ce point
-------- = élément de transport surchargé

Les flèches indiquent le sens de transit de la puissance active.

de la puissance au nœud, si l'on ne recourt pas à des manœuvres de couplage.

Si le critère A1 se réalise et si des manœuvres de couplage peuvent être effectuées, la surcharge peut être éliminée lorsque l'alimentation ou la charge sont divisées par le sectionnement de barres omnibus, comme il est indiqué à la figure 1.

Les surcharges peuvent, en outre, être éliminées par les manœuvres de couplage suivantes:

B1: La mise en parallèle d'éléments de transport, s'il en existe, avec l'élément surchargé.

B2: La mise hors service d'éléments de transport qui amènent de la puissance au nœud alimentant l'élément surchargé.

B3: L'adjonction d'éléments de transport amenant de la puissance au nœud qu'alimente l'élément surchargé.

Il faut naturellement vérifier si la mise hors service de l'élément surchargé ne conduit pas éventuellement à d'autres surcharges. L'application du critère A1 fournit à ce sujet une première information. Autrement, il faut effectuer un calcul du transit des charges pour ce nouvel état.

Si l'on considère les variations des puissances actives et réactives injectées et prises, les indications suivantes facilement explicables sont en général valables:

C1: La surcharge d'un élément de transport est éliminée, si la puissance injectée du côté par où l'élément est alimenté est réduite.

C2: La surcharge d'un élément de transport est éliminée, si la puissance prise du côté du nœud alimenté par l'élément est réduite.

Si l'on recourt à la mesure stipulée par C1, il faut veiller, dans la mesure du possible, à ce que la puissance dont on diminue la charge de l'élément surchargé, puisse être amenée à l'autre nœud pour couvrir la consommation.

Afin d'obtenir une information numérique sur la modification nécessaire d'une puissance fournie ou prise pour l'élimination d'une surcharge ou d'une baisse de tension, on peut se servir des coefficients de la matrice des impédances [3] du réseau, en déterminant la relation entre les courants de ligne et les courants injectés. Ainsi, on peut approximativement donner la valeur dont il faut réduire le courant injecté, pour que le courant de ligne soit diminué d'une quantité donnée.

Pour l'élimination des baisses de tension, il s'agit souvent d'injecter aux nœuds voisins davantage de puissance réactive.

Définition et détermination d'un indice de sécurité

Le fait que le calculateur détermine continûment (le réseau étant à l'état non perturbé), pour chaque état des charges, les mesures à prendre contre les perturbations envisagées, il est aussi possible d'indiquer à tout moment le pourcentage de la charge qui pourrait encore être couvert si, au moment considéré, la perturbation la plus défavorable apparaissait. Ce pourcentage, qui devrait de préférence atteindre toujours l'optimum de 100%, peut servir d'indice pour la sécurité du réseau. Cette information peut être, de plus, complétée par l'indication du nombre de manœuvres de couplage qui doivent être exécutées et par le nombre de nœuds où

des changements de puissance doivent intervenir, afin que ce pourcentage soit atteint. Le nombre à cinq chiffres 100–0–0 signifierait par exemple qu'au moment considéré, pour la perturbation la plus défavorable, 100 % de la charge peuvent être couverts sans recours à des manœuvres de couplage et sans changement de l'alimentation.

Pour le dispatcheur, cette indication signifie une information très importante sur l'état du réseau, lui permettant, lors d'une détérioration de l'indice de sécurité, de prendre les mesures pour améliorer de nouveau ce dernier. Ainsi, on obtient un autre niveau de surveillance superposé.

Exemples pour un réseau étudié

Pour éclaircir les principes traités ici, une série de perturbations furent calculées pour un réseau de transport hypothétique. Dans chaque cas, il a été supposé qu'un élément de transport était mis hors service et l'indice de sécurité correspondant déterminé. Le schéma du réseau avec répartition des charges en régime stationnaire est donné sur la figure 2. Le réseau a deux échelons de tension, 420 kV et 245 kV. Des consommateurs sont branchés en trois nœuds et on suppose que des alternateurs en alimentent trois autres.

Le tableau indique, pour chaque élément de transport, les suites qui apparaîtraient si l'on n'envisageait aucune mesure, les mesures qu'on peut mettre en exécution et qui donnent des résultats positifs. L'indice de sécurité indiqué donne brièvement la consommation pouvant être satisfaite et les opérations qui doivent être exécutées.

Mentionnons à cet effet que les courants maximaux admissibles correspondent à une puissance apparente de 1400 MVA à l'échelon 420 kV et à une puissance apparente de 350 MVA à l'échelon 245 kV. Les baisses de tension aux deux échelons dépassant 15 % sont considérées également inadmissibles.

L'état de charge stationnaire considéré peut être regardé comme pleine charge, de sorte que des réductions importantes de charge seraient nécessaires lors de la défaillance de lignes à 420 kV ou de transformateurs de couplage. Au contraire, on peut fort bien remédier à la défaillance de lignes à 245 kV, par des moyens appropriés. Les mesures à prendre consistent fréquemment à augmenter les puissances réactives injectées. Des manœuvres de couplage se sont avérées nécessaires lors de la défaillance d'un terne de la ligne double, entre les nœuds 06 et 07. On peut rapidement déterminer les manœuvres de couplage

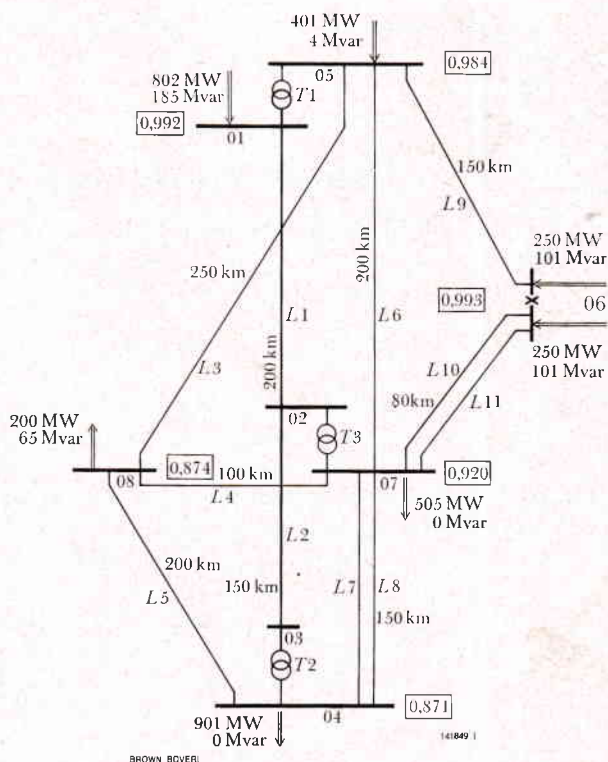


Fig. 2. – Schéma du réseau étudié à deux échelons de tension, 420 kV et 245 kV

01, 02, . . . = nœuds du réseau
$L1$, $L2$ = lignes à 420 kV
$L3$, $L4$, . . . = lignes à 245 kV
$T1$ = 300 MVA, $T2$ = 600 MVA, $T3$ = 600 MVA — transformateurs 420/245 kV
× = point de sectionnement de la barre omnibus 06
▭ = amplitude de la tension de barre omnibus en régime stationnaire, rapportée à 420 kV ou à 245 kV

à effectuer, par l'application du critère A3, en dessinant le cercle mentionné autour du nœud 06. Ce n'est qu'en sectionnant la barre omnibus que l'on peut charger uniformément les deux lignes restantes et partant du nœud 06.

L'indice de sécurité pour le cas de perturbation le plus défavorable atteint 68–0–2; si l'on n'envisage que les défaillances des lignes à 245 kV, on obtient 100–0–2.

Conclusions

Les réflexions, exposées ci-dessus, conduisent à la conception d'un système de surveillance centrale qui peut, par l'emploi d'un calculateur, protéger un

Suites et mesures à prendre en cas de défaillance d'éléments de transport dans le réseau de la figure 2

Défaillance	Suites	Mesures à prendre	Indice de sécurité
*L*1	Surcharge du *T*1 Effondrement de tension	Variations de puissance aux nœuds 01 et 04	68 – 0 – 2
*L*2	Surcharge du *T*3 baisse de tension en plusieurs nœuds	Variations de puissance aux nœuds 01 et 04	86 – 0 – 2
*L*3	Tension au nœud 08 réduite à 84 %	Davantage de puissance réactive des nœuds 04 et 07	100 – 0 – 2
*L*4	Tension au nœud 08 réduite à 76 %	Davantage de puissance réactive du nœud 04	100 – 0 – 1
*L*5	Aucune	Aucune	100 – 0 – 0
*L*6	Aucune	Aucune	100 – 0 – 0
*L*7, *L*8	Tension au nœud 04 réduite à 83 %	Davantage de puissance réactive du nœud 04	100 – 0 – 1
*L*9	Aucune	Aucune	100 – 0 – 0
*L*10, *L*11	Surcharge de *L*11 et de *L*10	Sectionnement de la barre omnibus 06 au point *T*. Davantage de puissance réactive du nœud 04	100 – 1 – 1
*T*1	Aucune	Aucune	100 – 0 – 0
*T*2	Surcharge du *T*3, baisse de tension en plusieurs nœuds	Variations de puissance aux nœuds 01 et 04	88 – 0 – 2
*T*3	Surcharge du *T*2	Davantage de puissance réactive du nœud 04	100 – 0 – 1

réseau de transport d'énergie contre les suites fort graves des défaillances de lignes et de transformateurs. L'objet principal a été le processus de recherche dans le calculateur. L'indice de sécurité, proposé et défini ici, fournit au dispatcheur une information que celui-ci met à profit pour améliorer l'état du réseau et la sécurité du service.

(A. G.)

HANS GLAVITSCH et RENÉ PICHARD

Bibliographie

[1] T. E. DY LIACO: The Adaptive Reliability Control System. *IEEE Transactions* PAS-86 (1967), n° 5, p. 517 à 531.

[2] H. EDELMANN: Ein neues Lastflussprogramm kürzester Rechenzeit. *Elektrotech. Z.* Ed. A, vol. 87 (1966), n° 7, p. 217 à 221.

[3] R. BAUMANN: Automatisierte digitale Netzberechnung. *Elektronische Rechenanlagen*, vol. 2 (1960), n° 2, p. 75 à 84.

Différents modes de couplage du dispositif de protection de distance Brown Boveri, avec transmission d'un signal au poste de transformation opposé

621.316.925.45

Afin de pouvoir faire ouvrir simultanément les disjoncteurs aux deux extrémités d'une ligne dès l'apparition d'un défaut sur cette ligne, il est nécessaire de transmettre des signaux de commande d'un poste de transformation à l'autre. Différents modes de couplage sont possibles. Cet exposé se propose de donner une vue d'ensemble des montages, utilisés avec les relais de distance Brown Boveri et de montrer leur principe de fonctionnement.

Le relais de distance est chargé principalement d'éliminer d'une manière sélective les défauts se produisant dans un réseau. L'élimination doit avoir lieu, en tenant compte de l'endroit du défaut, soit instantanément, soit avec un certain retard. En général, le relais de distance ne dispose, pour déterminer l'endroit du défaut, que des courants et tensions mesurés au lieu d'installation; il est donc indépendant de transmissions de signaux ou de données en provenance d'autres postes. La détermination de la direction du défaut est en général assez précise, lorsque l'appareil est bien conçu, par contre, la mesure de la distance est toujours entachée d'une certaine erreur qui tient partiellement au fait que l'impédance de la ligne n'est jamais connue avec exactitude. Le relais de distance est en général dans l'impossibilité de distinguer, si le défaut est situé en amont ou en aval, à proximité du poste de transformation opposé. Afin d'obtenir un temps de déclenchement bien défini pour ces défauts, il faut que le réglage du premier gradin du relais dépasse ou ne dépasse pas le poste opposé avec une marge suffisante. Dans le premier cas, il peut se produire un déclenchement résultant d'un manque de sélectivité pour des défauts, se produisant au début d'une ligne adjacente, ce qui est en général inacceptable. Dans le second cas, il résulte un déclenchement retardé pour des défauts se produisant à l'extrémité de la ligne. Cet état de choses est admissible si l'on renonce à un réenclenchement rapide.

Il existe depuis longtemps des montages qui permettent d'éliminer ces désavantages; leur principe réside dans l'utilisation de la détermination de la direction et la mesure de distance du relais équipant le poste opposé. Les signaux numériques, en provenance de ce poste, peuvent être transmis et exploités à la réception de différentes manières. Chaque méthode a ses particularités, dont il faut tenir compte lors de l'établissement d'un projet. Il faut en particulier observer les points suivants:

- sécurité de déclenchement
- sécurité contre des déclenchements intempestifs dus à des signaux parasites
- sélectivité
- temps de déclenchement.

Il faut étudier particulièrement les cas dans lesquels le fonctionnement du relais de distance est soumis à des conditions plus sévères, par exemple lorsqu'il se produit des défauts à la terre dans des tronçons parallèles (influence mutuelle de l'impédance homopolaire), lorsqu'il existe des mises à la terre présentant des résistances élevées ou lors d'une alimentation de faible puissance à l'une des extrémités ou de la présence de trois ou plusieurs extrémités.

Les montages se distinguent en premier lieu par le mode d'exploitation des signaux transmis. Ces signaux peuvent être utilisés pour faire ouvrir un disjoncteur, ou pour verrouiller son ouverture, ou pour prolonger le temps de base du relais de distance, monté à l'autre extrémité de la ligne. Ces montages se distinguent ensuite par le réglage du premier gradin qui sera ou bien plus court ou plus long que la section de ligne à protéger. Dans le dernier cas, le montage perd son caractère de relais de distance et il est principalement utilisé pour la comparaison de directions, ce qui signifie qu'en cas de panne des installations de transmission, il peut se produire des déclenchements inutiles ou aucun déclenchement pendant le temps de base.

Dans ce qui va suivre, on va décrire le fonctionnement de différents montages utilisant en particulier le nouveau relais de distance Brown Boveri, type LZ 3 [1][1]. Ces montages sont également applicables au

[1] Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 371.

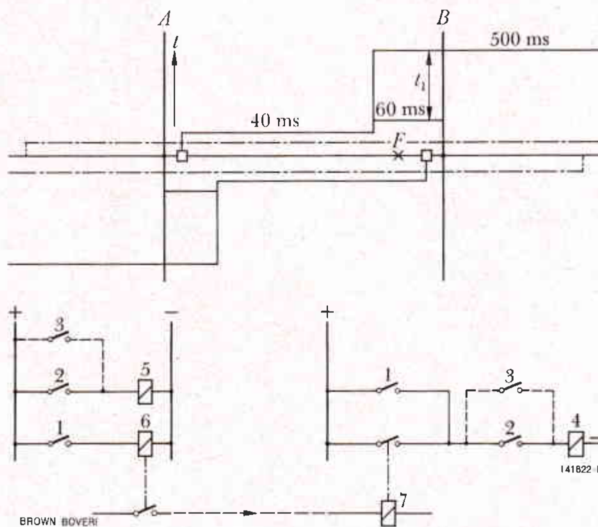


Fig. 1. – Télécommande de déclenchement indirecte, utilisée avec des relais de distance, type LZ 3

——— = caractéristique de déclenchement du relais de distance
—·—·— = domaine d'action du relais à minimum d'impédance compoundé
A, *B* = postes d'extrémités de ligne
1 = contacts des contacteurs de déclenchement, type FD
2 = contacts des relais à minimum d'impédance compoundés, type CA (triphasés)
3 = contacts des relais à minimum de tension type CUH (triphasés)
4 = bobine de commande d'ouverture du disjoncteur
5 = bobine de commande de l'émetteur (HF) pour transmission par courants porteurs
6 = relais d'émission (HF)
7 = relais de réception (HF)
t_1 = gain sur le temps de déclenchement
F = point de défaut

relais de distance statique, type LZX 3 [2]. Le moyen de transmission, utilisé le plus souvent, est la liaison par courants porteurs sur lignes de transport d'énergie à haute tension, cependant des liaisons par fils pilotes ou par faisceaux herziens sont également applicables.

1. Télécommande de déclenchement indirecte, avec contrôle du signal à la réception

Cette méthode de protection (fig. 1) est la plus employée dans les montages exécutés par la Société Brown Boveri. Ces derniers sont principalement utilisés avec des liaisons par courants porteurs sur lignes de transport d'énergie à haute tension et ont fait l'objet de plusieurs exposés qui ont paru dans cette revue [3, 4, 5].

Le premier gradin du relais de distance est réglé à une valeur équivalente à 85 à 90 % de la longueur de la ligne à protéger; le signal du relais provoque aussi bien l'ouverture du disjoncteur du propre poste que celui du poste opposé. Cependant l'ordre transmis n'est exécuté dans ce poste qu'après vérification, par le dispositif de démarrage à minimum d'impédance du relais de distance local, de la présence du défaut. Il est ainsi possible d'obtenir un degré de sécurité élevé vis-à-vis des déclenchements intempestifs, dus à des signaux parasites. Ce montage assure l'ouverture des disjoncteurs des deux extrémités de la ligne pour des défauts se produisant sur la section protégée, pendant le temps de base ou bien pendant le temps de base augmenté du temps de transmission; la condition essentielle pour un réenclenchement rapide est donc remplie. Il faut cependant qu'une alimentation suffisante soit assurée aux deux extrémités de la ligne.

Si cette condition d'alimentation n'est pas remplie, il faudra prendre les mesures nécessaires. Si par exemple le poste *B* ne comprend que des récepteurs ou des générateurs relativement faibles, les relais à minimum d'impédance de ce poste *B* ne réagiront pas à l'apparition d'un défaut sur la ligne de transport. Afin d'assurer dans ce cas l'exécution de l'ordre d'ouverture du disjoncteur *B*, émis par le relais *A*, on utilise un relais supplémentaire. Ce dispositif, composé de trois relais à minimum de tension monophasés réagira certainement à la baisse de tension en *B*, l'impédance d'alimentation étant très élevée en ce point. On peut également considérer que l'alimentation au point *B* est faible, lorsque la ligne est très longue, pour un défaut se produisant à proximité du poste *A*. La chute de tension est alors trop faible et l'emploi d'un relais à minimum de tension compoundé est obligatoire [3]. Ce relais est sensible au produit de la tension existant en *B* par une tension existant sur la ligne à une distance équivalente à 70 % de sa longueur à partir de *B*. Ce produit est sensiblement plus faible, pour tous les défauts se produisant entre *A* et *B*, qu'en service normal il peut même devenir négatif; sa valeur peut donc être prise comme critère, pour donner le passage à l'ordre d'ouverture du disjoncteur, en provenance du poste *A*. Au déclenchement définitif de la ligne, l'occupation d'une voie de la liaison par courants porteurs par le signal du relais à minimum de tension est supprimée et la voie est à nouveau disponible pour les signaux téléphoniques et de télémesure [4].

Les contacts de ce relais à minimum de courant sont branchés en parallèle sur ceux du relais de démarrage (relais à minimum d'impédance) et le complètent. L'importance de cette combinaison ne réside pas seulement dans le fait que la sécurité de dé-

clenchement des deux disjoncteurs est accrue mais que le choix de la phase est correct, ce qui est très important pour une exploitation du réseau avec réenclenchement rapide monophasé.

Chaque extrémité de la ligne est équipée d'un relais de distance, type LZ 3 et d'un relais à minimum de tension. Si l'on exige des temps de déclenchement très courts, l'installation comprenant le relais de distance, type LZ 3 est complétée par un relais à une période, lui-même équipé du relais à minimum de tension. Cette association présente, en outre, l'avantage de doubler pratiquement le dispositif de protection de la ligne, ce qui contribue à augmenter sensiblement la sécurité de déclenchement. L'emploi du relais de distance statique, type LZX 3 est encore plus avantageux. Celui-ci a en effet une très grande vitesse de déclenchement pour le premier gradin et celle-ci est pratiquement indépendante du point de défaut et du rapport entre l'impédance d'alimentation et l'impédance de défaut.

2. Déclenchement interdépendant avec accélération de stade

Le dispositif de déclenchement interdépendant avec accélération de stade (fig. 2) est utilisé pour porter de 85 % à environ 130 % la longueur de protection du relais de distance, grâce à la réception d'un signal en provenance du poste opposé. La différence, par rapport à la télécommande indirecte de déclenchement, réside dans le fait que le relais de distance doit effectuer une mesure supplémentaire; ce qui entraîne naturellement un certain retard. Cependant ce montage présente une sécurité accrue contre les déclenchements intempestifs. Dans le cas de la télécommande indirecte avec contrôle du signal à la réception, il est théoriquement possible qu'un signal parasite arrive en même temps qu'un ordre d'autorisation, en provenance de l'organe de démarrage; il s'ensuit un déclenchement. Cette possibilité n'existe pas dans le cas du déclenchement interdépendant. Il faut toutefois ajouter qu'il existe des équipements de transmission par courants porteurs ayant une grande insensibilité vis-à-vis des parasites [4].

Les relais, types LZ 3 et LZX 3, peuvent également fonctionner en couplage à déclenchement interdépendant avec accélération de stade. Dans ce cas, les relais à minimum de tension deviennent inutiles et sont supprimés. En effet, un déclenchement ne peut avoir lieu que si le relais à minimum d'impédance a agi et que le relais de distance a été mis en route. Le relais à minimum de tension n'est d'aucune utilité dans le cas d'une alimentation de faible puissance, le montage à déclenchement interdépendant ne fonctionne donc pas.

3. Télécommande de déclenchement directe indépendante des critères du poste récepteur

Dans le cas de la télécommande de déclenchement directe (fig. 3), le relais de distance déclenche, par l'intermédiaire de son premier gradin, non seulement le disjoncteur du propre poste, mais il émet également un signal vers le poste *B*, destiné à commander l'ouverture du disjoncteur de ce dernier. On obtient ainsi un degré de sécurité élevé en ce qui concerne l'élimination des défauts sur la ligne protégée. L'ordre de déclenchement de chaque relais est directement transmis aux deux disjoncteurs. Le déclenchement a toujours lieu, aux deux extrémités, pendant les périodes de fonctionnement des deux premiers gradins, augmentées du temps de transmission, même si le relais *B* subit un retard ou ne réagit pas du tout; par exemple, lors d'une alimentation de faible puissance ou de la saturation du transformateur de courant principal ou de défauts à la terre présentant une résistance élevée ou même en cas de panne du relais lui-même.

Un seul signal de réception déterminant le déclenchement du disjoncteur, la qualité de la transmission doit être élevée, afin d'éviter des déclenchements intempestifs [6]. Il est possible d'augmenter la sécurité en transmettant l'ordre de déclenchement

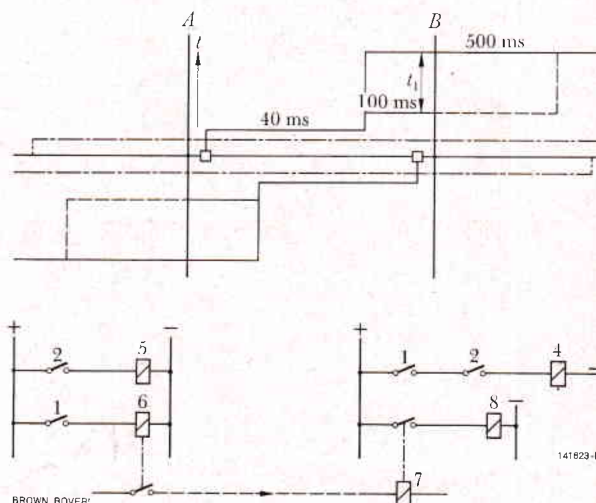


Fig. 2. – Déclenchement interdépendant avec accélération de stade, utilisé avec des relais de distance, type LZ 3

8 = relais auxiliaires, type CSA, pour temporisation de la commutation de la portée

Pour les autres désignations, voir la figure 1.

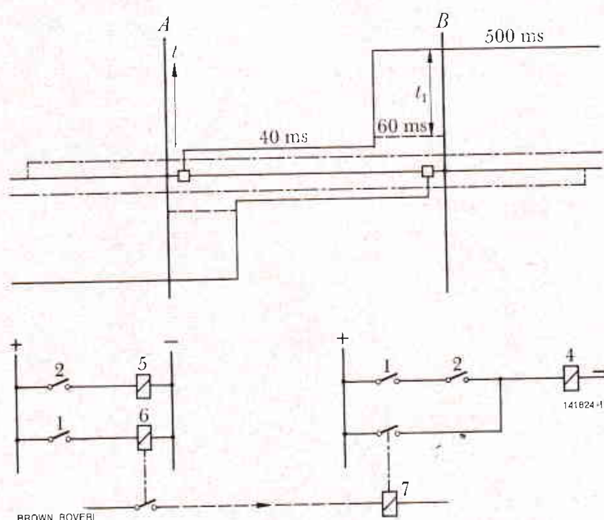


Fig. 3. – Télécommande de déclenchement directe, utilisée avec des relais de distance, type LZ 3

Pour les désignations, voir la figure 1.

sur deux voies différentes et en branchant en série les contacts des deux relais de réception. Un déclenchement intempestif ne peut avoir lieu que si un signal parasite est reçu, sur chaque voie, au même moment, ce qui est très improbable.

On peut envisager une autre solution, à savoir l'emploi d'un signal codé. Le mot de code devra être bref afin de ne pas augmenter le temps de transmission et la largeur de bande devra être suffisante pour permettre l'usage d'impulsions étroites [7].

La télécommande de déclenchement directe ne peut guère être employée pour une exploitation avec réenclenchement rapide monophasé, car elle suppose un choix de la phase à la réception. Il serait malgré tout possible d'employer ce système, en attribuant une voie de transmission à chaque phase, cependant les frais engendrés seraient en général trop élevés.

4. Particularités résultant du réglage du premier gradin sur une longueur correspondant à 85% de la longueur de la ligne

Dans les trois montages mentionnés, le premier gradin du relais de distance est réglé sur environ 85 % de la longueur de la ligne à protéger. Il en résulte qu'en cas de panne de la transmission, le déclenchement sélectif est toujours assuré. Il faut cependant admettre un déclenchement pendant le temps de fonctionnement du second gradin, lorsque, pour une alimentation en *B* faible ou manquante, un défaut (*F*) apparaît à proximité de ce poste; dans ce cas un réenclenchement rapide n'aura pas lieu, car le déclenchement commandé par le second gradin provoque le verrouillage du dispositif de réenclenchement.

Le réglage du premier gradin des trois relais de distance protégeant des lignes, ayant trois extrémités, c'est-à-dire en forme de T, ne devra pas dépasser une valeur équivalente à 85 % de la longueur de la ligne comprise entre deux postes. La plage de recouvrement est ici beaucoup plus faible que dans le cas de lignes normales. Dans de telles sections de réseaux, les dispositifs de couplage de la haute fréquence prennent une grande importance. Un dispositif de couplage spécial de la haute fréquence a été développé pour cette application; une description de son fonctionnement et de ses applications a déjà paru dans cette revue [8]. Lors de l'établissement du projet, il faudra dimensionner l'installation de telle façon que dans tous les cas, au moins un des trois relais de distance déclenche pendant le temps de base. De plus, la réception de l'ordre de déclenchement dans les autres postes doit toujours être assurée, à moins que l'on utilise la télécommande de déclenchement directe. Les conditions de travail sont particulièrement sévères, lorsque les longueurs des deux sections, comprises entre les postes extrêmes et la dérivation, sont très différentes et lorsque les puissances de court-circuit maximale et minimale varient dans une large mesure. Il est utile de contrôler par un calcul soigneux le bon fonctionnement du montage choisi [9]. Dans certains cas défavorables, il faut même admettre que les disjoncteurs ouvrent les uns après les autres au lieu d'ouvrir en même temps.

L'ordre de déclenchement, nécessaire aux montages dont on vient de parler, est en général transmis par courants porteurs circulant sur la ligne en défaut, il peut arriver que le signal soit affaibli au cours de cette transmission par suite de la présence du défaut. Cependant l'expérience, acquise au cours de longues années d'exploitation, a montré qu'il était possible d'atteindre pratiquement une sécurité absolue, d'une part par l'emploi de dispositifs appropriés, d'autre part en utilisant un couplage sur deux phases [4].

5. Comparaison de directions avec transmission d'un signal de verrouillage

Le premier gradin est réglé de telle façon que sa valeur dépasse la longueur de la ligne. Il est nécessaire, dans ce cas, de verrouiller le déclenchement pour un défaut, se produisant sur le jeu de barres du poste opposé ou sur une ligne parallèle, afin d'éviter toute erreur de sélection. Suivant le type de relais de distance employé, on utilise différents montages.

Sur la figure 4 on peut voir, à chaque extrémité de la ligne, un relais de distance à une période ainsi qu'un relais à minimum d'impédance à compoundage négatif. Lors d'un court-circuit en F_1, le relais de distance du poste B est verrouillé par le signal, en provenance du relais à minimum d'impédance du poste A. Le déclenchement par le relais à une période doit obligatoirement être temporisé, afin de permettre l'arrivée éventuelle d'un ordre de verrouillage, destiné à empêcher ce déclenchement. Le réglage de cette temporisation doit tenir compte des tolérances sur les vitesses de réaction des relais et du temps de transmission. Pour un court-circuit, se produisant en F_2, l'ordre de verrouillage en provenance de B doit être immédiatement arrêté par l'ouverture du contact 1 du relais de distance A afin de permettre le déclenchement.

Afin d'éviter le retard dont on vient de parler, au moins pour les défauts, se produisant sur la section médiane de la ligne protégée, on peut ajouter à chaque extrémité de celle-ci un second relais de distance, dont le réglage correspond à environ 85 % de sa longueur et qui fonctionne indépendamment, c'est-à-dire que les signaux en provenance du poste opposé n'ont aucune influence sur lui.

L'emploi d'un relais de distance à plusieurs gradins a l'avantage de la simplicité. Le premier gradin est réglé sur une valeur correspondant à environ 85 % de la longueur de la ligne. Après une courte temporisation, une commutation porte ce réglage à une valeur de 130 %, si aucun ordre de verrouillage, en provenance du poste opposé, n'a interrompu le déroulement des opérations. La figure 5 représente le schéma de principe de ce montage, utilisé avec un relais de distance, type LZ 3, équipé d'un relais temporisé pour la commutation du premier gradin de protection.

Pour des défauts dans la section médiane de la ligne, où les gradins de base des relais se recouvrent, les relais déclenchent normalement pendant le temps de base. Au contraire, si le défaut se trouve en F_1, la portée du relais de distance B est augmentée à la fin de la temporisation du relais de commutation. Le relais à minimum d'impédance du poste A émet toutefois un signal de verrouillage, mais celui-ci est à nouveau coupé par le relais 1. Si l'alimentation par le poste A est faible ou inexistante, le signal de verrouillage n'est pas émis du tout et le relais B déclenche normalement, après l'écoulement du délai de temporisation. Lors d'un court-circuit en F_2, A émet un signal de verrouillage, empêchant l'augmentation de la portée du relais B. La commutation normale sur le second gradin a lieu dans les délais normaux; c'est-à-dire à la fin du temps de fonctionne-

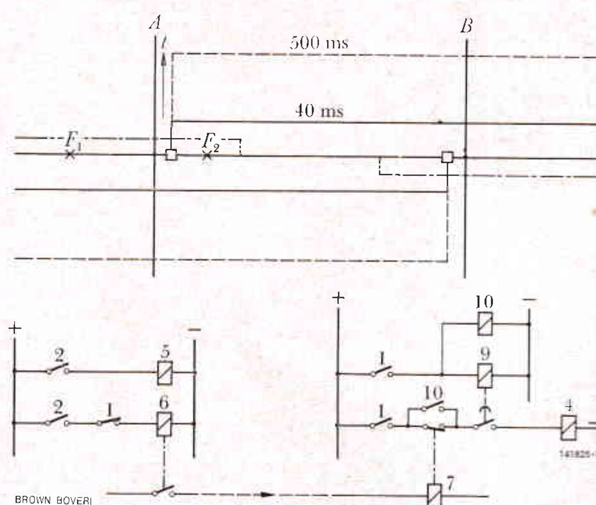


Fig. 4. – Comparaison de directions avec transmission d'un signal de verrouillage, utilisée avec un relais à une période et à un gradin

——— = caractéristique de déclenchement du relais à une période
–·–·— = domaine d'action du relais à minimum d'impédance, travaillant avec un compoundage négatif
- - - - = protection de réserve
1 = contacts du contacteur de déclenchement, type FD
2 = contacts du relais à minimum d'impédance compoundé, type CA
4 = bobine de commande d'ouverture du disjoncteur
5 = bobine de commande de l'émetteur (HF)
6 = relais d'émission (HF)
7 = relais de réception (HF)
9 = relais auxiliaire temporisé
10 = relais temporisé
F_1, F_2 = points de défaut

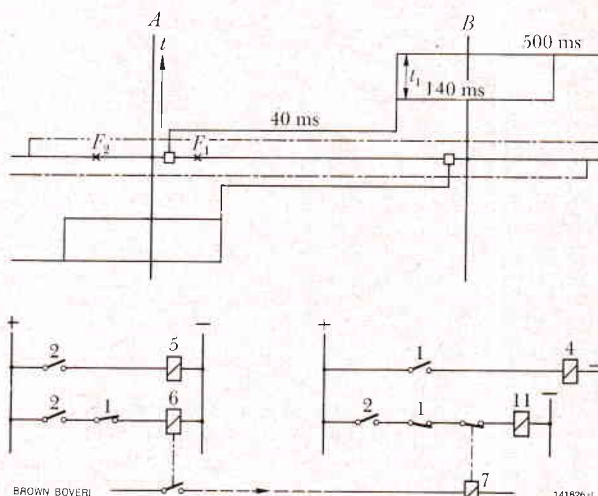


Fig. 5. – Comparaison de directions avec transmission d'un signal de verrouillage, utilisée avec des relais de distance, type LZ 3

11 = relais auxiliaire temporisé pour commutation de la portée. Pour les autres désignations, voir la figure 1.

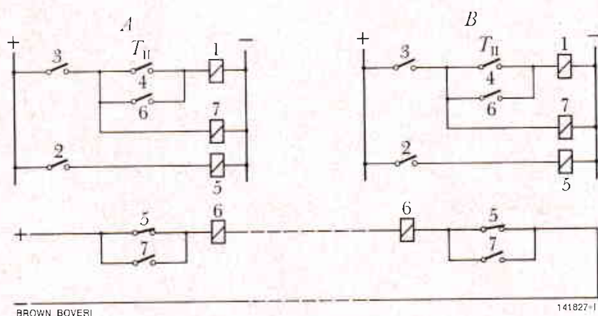


Fig. 6. – Liaison par fils pilotes entre relais de distance, types LZ 3

1 = contacteur de déclenchement
2 = contacts des relais à minimum d'impédance, type CA
3 = contacts des organes de mesure de la distance, type PU
4 = contacts du relais de temporisation
5, 6, 7 = relais auxiliaires, types RTA, FU et FC

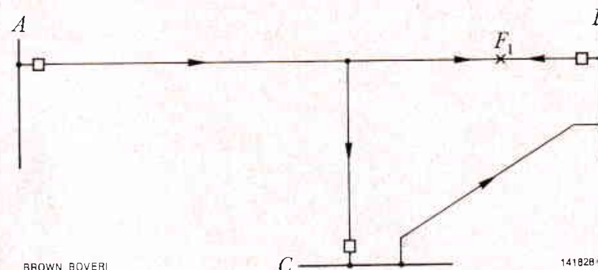


Fig. 7. – Section de ligne en T avec ligne parallèle

Verrouillage du déclenchement pour un défaut, se produisant sur un bras du T, par l'énergie de court-circuit traversant le relais C en allant vers l'extérieur de la section considérée.

ment du second gradin, si toutefois le court-circuit sur la ligne adjacente existe toujours.

La figure 6 représente un autre montage, utilisé en particulier sur les lignes courtes, qui présentent une impédance plus faible que l'impédance minimale, réglable sur le relais. Le premier gradin ne peut présenter qu'un réglage de portée supérieur à la longueur de la ligne. Il est possible, à l'aide d'un simple relais supplémentaire et d'une liaison par fils pilotes, de coupler les deux relais, type LZ 3, entre eux de telle sorte que, à l'apparition d'un défaut, il se produise un verrouillage qui est ensuite éliminé ou non, suivant la situation du point de défaut.

A l'apparition de défauts sur la ligne protégée, alimentée par ses deux extrémités, les relais à minimum d'impédance réagissent et excitent les relais 5 qui coupent l'alimentation des relais 6, normalement excités; ceux-ci retombent en position de repos. Les contacteurs de déclenchement ne sont provisoirement pas excités par les relais de mesure 3, par contre les relais 7, insérés dans le circuit pilote vont prendre la position de travail. Les relais 6 sont à nouveau excités et les contacteurs de déclenchement 1 également, il en résulte un déclenchement aux deux extrémités de la ligne.

Dans le cas d'un défaut sur la section de ligne protégée et d'une alimentation par une seule extrémité, le dispositif de protection fonctionne dans les mêmes conditions, cependant il n'a aucune action côté consommateur et ne provoque ainsi pas de verrouillage.

Si le défaut se produit en dehors de la section de ligne protégée, seul le relais de mesure 3 d'un poste réagit et le verrouillage n'est pas levé.

Après achèvement de la seconde période T_{II} (temporisateur mécanique 4), le verrouillage est rendu inefficace et les deux relais fonctionnent indépendamment selon leurs caractéristiques propres. La protection de réserve des lignes adjacentes est ainsi assurée par les gradins supérieurs du relais de distance.

Le montage à comparaison de directions, avec transmission d'un ordre de verrouillage, présente l'avantage de la transmission du signal sur une ligne en bon état. En outre, tous les défauts sont éliminés sans retard même dans le cas d'une alimentation par une seule extrémité. Il existe cependant le danger d'un déclenchement non sélectif, en cas de panne de l'équipement de transmission; par une surveillance permanente de l'état de fonctionnement de la transmission, il est toutefois possible de réduire ce danger à de très faibles proportions.

Lors de la projection de sections de ligne en forme de T, un calcul sérieux est nécessaire pour s'assurer du fonctionnement correct du dispositif de protection [9]. Les relais de distance doivent être réglés pour une distance supérieure à la section qui leur est impartie, on est souvent obligé d'aller à la limite du possible, car il faut tenir compte d'une injection de courant élevée au point de dérivation. Il faut particulièrement se méfier de la possibilité d'une erreur de verrouillage, lorsque deux des postes sont réunis entre eux par d'autres lignes comme par exemple les postes *B* et *C* de la figure 7. Lors d'un court-circuit en F_1, un ordre de verrouillage est émis par le poste *C*, empêchant ainsi le déclenchement. Il faut, dans ce cas, ajouter un critère supplémentaire, concernant le sens d'écoulement de l'énergie dans la liaison directe entre *C* et *B*, à ceux nécessaires à l'émission de l'ordre de verrouillage.

6. Comparaison de directions avec transmission d'un signal d'autorisation préalable (figure 8)

Dans ce montage, le réglage du gradin de base a également une valeur étendant son action au-delà

du poste opposé. Cependant l'ordre de déclenchement n'est exécuté qu'après réception du signal d'autorisation, en provenance du premier gradin du relais de distance du poste opposé. Cela entraîne obligatoirement le fonctionnement des deux relais de distance, c'est-à-dire que les alimentations aux deux extrémités doivent être assez puissantes. Il est de plus nécessaire, en cas de panne de la transmission, de prévoir un signal d'autorisation, émis automatiquement par le relais lui-même après un certain délais et indépendamment de toute réception. Les temps de déclenchement sont, dans leur ensemble, plus longs que pour la méthode de télécommande de déclenchement, car, pour tous les défauts, les temps de déclenchement des relais de distance sont augmentés des temps de transmission.

Ce montage n'est pour ces raisons pratiquement pas ou peu employé. On ne l'applique que lorsque tous les autres montages sont inutilisables. Ce cas peut se présenter pour des lignes fonctionnant avec des condensateurs-série assurant un degré de compensation élevé et montés à proximité d'un poste [10]. La détermination de la direction par les relais de distance est, dans ce cas, plus difficile, particulièrement pour les relais couplés à des lignes adjacentes ou à des tronçons parallèles. Toutefois, un verrouillage du relais du poste opposé évite tout déclenchement intempestif de lignes non touchées. Pour le montage de comparaison de directions, avec émission d'un signal d'autorisation préalable, décrit ci-dessus, on utilise principalement le relais à un gradin et une période Brown Boveri, type L6fT, comme protection principale, celui-ci élimine la plupart des défauts en un temps très court, tandis qu'on complète cette protection par une protection de réserve, utilisant le relais de distance, type LZ3, à plusieurs gradins dans un montage à déclenchement interdépendant avec accélération de stade.

(B. T.) JEAN GANTNER

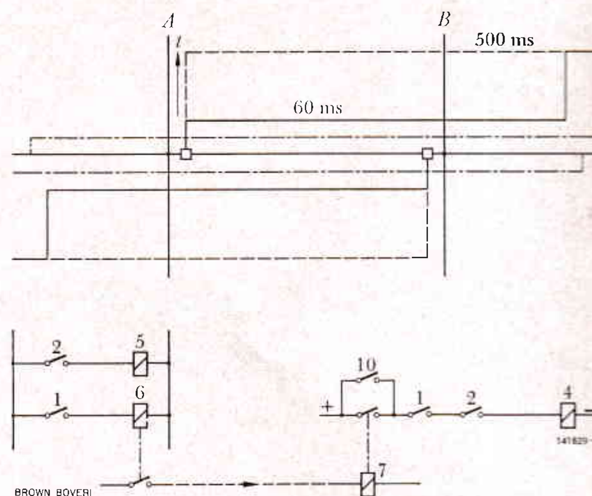


Fig. 8. – Comparaison de directions, avec transmission d'un signal d'autorisation préalable, utilisée avec un relais de distance, type LZ 3

——— = caractéristique de déclenchement du relais de distance
–·–·–– = domaine d'action du relais à minimum d'impédance compoundé
A, B = postes d'extrémités de ligne
1 = contacts du contacteur de déclenchement, type FD
2 = contacts du relais à minimum d'impédance compoundé, type CA (triphasé)
4 = bobine de commande d'ouverture du disjoncteur
5 = bobine de commande de l'émetteur (HF)
6 = relais d'émission (HF)
7 = relais de réception (HF)
10 = relais temporisé

Bibliographie

[1] H. BARCHETTI: Un nouveau relais de distance pour les réseaux à haute tension. *Rev. Brown Boveri*, t. 53 (1966), n° 11/12, p. 776 à 783.

[2] M. TÖNNES: Relais de distance électronique. *Rev. Brown Boveri*, t. 53 (1966), n° 11/12, p. 784 à 790.

[3] M. MÜLLER, F. GYGAX, CH. HAHN et P. BALTENSPERGER: La protection des longues lignes de réseaux à très haute tension, avec application de la coupure et de la refermeture unipolaires. *Rev. Brown Boveri*, t. 45 (1958), n° 6, p. 243 à 253.

[4] A. DE QUERVAIN et CH. HAHN: La liaison par onde porteuse sur ligne à haute tension pour la protection de distance. *Rev. Brown Boveri*, t. 47 (1960), n° 5/6, p. 345 à 352.

[5] CH. HAHN: Dispositifs de protection et relais pour lignes à très haute tension. *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 1/2, p. 93 à 100.

[6] B. BOZOKI: Effects of Noise on Transfer-Trip Carrier Relaying. *IEEE Trans. Pwr Appar. & Syst.*, vol. PAS–87 (1968), n° 1, p. 173 à 179.

[7] A. ZOTTER: Appareils, type NSD, pour la transmission de signaux de protection. *Rev. Brown Boveri*, t. 55 (1968), n° 4/5, p. 236 à 240.

[H] H. HAUG: Couplage, au moyen de liaisons à haute fréquence sur lignes à haute tension, des relais de protection de distance dans les réseaux avec lignes en T et dans le cas de lignes doubles. *Rev. Brown Boveri*, t. 49 (1962), n° 3/4, p. 133 à 146.

[9] W.D. HUMPAGE et D.W. LEWIS: Distance Protection of Teed Circuits. *Proc. IEE*, vol. 114 (1967), n° 10, p. 1483 à 1498.

[10] V. NARAYAN: Dispositif de protection de distance pour lignes à haute tension fonctionnant avec un condensateur-série. *Rev. Brown Boveri*, t. 55 (1968), n° 7, p. 372 à 382.

Dispositif de protection de distance pour lignes à haute tension fonctionnant avec un condensateur-série

621.316.925.45

Les lignes à haute tension, fonctionnant avec un condensateur-série, posent des problèmes particuliers au dispositif de protection de distance, car le condensateur présente une réactance négative. Cette réactance, mesurée par le dispositif de protection, présente des valeurs très différentes avant et après le fonctionnement de l'éclateur de protection du condensateur.

Après une analyse complète des courants et tensions de court-circuit le long d'une ligne double, dont l'inductance est compensée à 80% par un condensateur-série, on décrira le fonctionnement du relais de distance avant et après le fonctionnement de l'éclateur. Dans la suite de l'exposé, on donnera, comme exemple, l'emploi d'un dispositif de protection de distance pour ligne de transport, fonctionnant avec un condensateur-série, équipé de circuits principaux et de réserve à réaction rapide, mais nécessitant la transmission de signaux. En conclusion, on peut dire que les lignes de transport d'énergie, fonctionnant avec un condensateur-série, peuvent être protégées d'une manière sélective par un relais de distance Brown Boveri, branché à leur départ.

Exposé du problème

Les condensateurs-série trouvent leur emploi, associés à des lignes de transport d'énergie à haute tension. Ils contribuent à améliorer la stabilité de la tension et du fonctionnement, etc. [1, 2][1].

A l'origine, le condensateur-série était, dans la plupart des cas, inséré au milieu de la ligne de transport et le degré de compensation de la réactance de ligne ne dépassait pas 50%. Avec l'augmentation des distances de transport de l'énergie, des condensateurs procurant un degré de compensation de 70 à 80% sont couramment employés. En outre, pour des raisons économiques, on est obligé de coupler le condensateur-série, au départ de la ligne, à proximité d'un poste de transformation [3].

La réactance du condensateur-série peut, dans le cas d'un degré de compensation élevé, gêner le fonctionnement sélectif du dispositif de protection. De plus la chute de tension relativement élevée, due aux courants de court-circuit, pose de nombreux problèmes, concernant les niveaux d'isolement, les dangers de résonance, etc. Il est possible de trouver une solution à ces problèmes par le branchement, en parallèle sur le condensateur-série, d'un éclateur de protection. Cet éclateur réagit, lorsque la différence de potentiel aux bornes du condensateur dépasse un certain niveau. En général, ces éclateurs sont réglés pour fonctionner pour un courant, les traversant, égal de 2 à 3 fois le courant nominal. Le fonctionnement sélectif d'un dispositif de protection directionnel, ou à comparaison de phases, dépend de la vitesse à laquelle l'éclateur court-circuite le condensateur, par contre, le fonctionnement correct du dispositif de protection de distance est indépendant de cette vitesse [5].

Dans le présent exposé, on va montrer, à l'aide d'un exemple, qu'il est possible d'obtenir une protection sélective, en utilisant un relais de distance, même dans le cas d'une ligne de transport d'énergie double, ayant un fort degré de compensation, obtenu par branchement d'un condensateur-série au départ de celle-ci.

Généralités

La protection de lignes de transport d'énergie, travaillant avec un condensateur-série, est délicate d'une part, à cause de la réactance négative présentée par le condensateur, d'autre part à cause des valeurs différentes que présente, avant et après le fonctionnement de l'éclateur, la réactance de la ligne

[1] Nombres entre crochets, voir la bibliographie, p. 382.

vue par le relais (fig. 1). Après le court-circuitage du condensateur-série, la réactance totale de court-circuit augmente ce qui a pour effet de diminuer le courant de court-circuit. Ce dernier assure cependant, sans difficultés, le fonctionnement du relais de distance, car la mesure correcte de la distance est également possible pour des courants inférieurs au courant nominal (env. 0,25 à 0,6 · I_n).

L'intensité des courants de court-circuit dépend du point de défaut, du genre de défaut et de la puissance d'alimentation. Dans certains cas, par exemple lorsque le courant de court-circuit est du même ordre de grandeur que le courant nominal, la décharge à travers l'éclateur ne peut avoir lieu. On peut cependant admettre que, dans un réseau où des condensateurs-série, donnant un degré de compensation élevé, sont nécessaires, le courant dû à un court-circuit éclatant à proximité de ce condensateur est assez grand pour provoquer le fonctionnement de l'éclateur.

Le dispositif de protection de distance doit être en mesure de fonctionner d'une manière sélective aussi bien avant qu'après le fonctionnement de l'éclateur.

Dans le cas où la réactance du condensateur-série ne dépasse pas 50 % de la réactance de la ligne de transport et où ce condensateur est branché au milieu de cette ligne, le problème est un peu plus simple, car la réactance, vue par le relais de distance, est toujours inductive, qu'il y ait eu décharge ou non à travers l'éclateur. Ce cas particulier a fait l'objet d'un article qui a déjà paru dans cette revue [6].

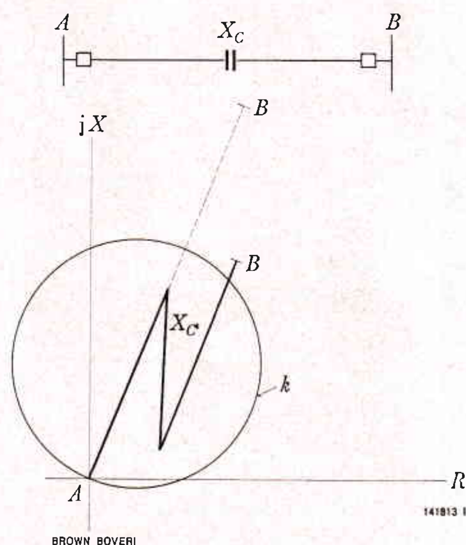


Fig. 1. – Impédance d'une ligne, avant et après le fonctionnement de l'éclateur de protection du condensateur

A, B = postes de transformation (équipés de relais)
——— = impédance de la ligne avec le condensateur-série en service
- - - - = impédance de la ligne avec le condensateur-série court-circuité
X_C = réactance du condensateur (inférieure à 50 % de la réactance de la ligne)
k = cercle de déclenchement du relais de distance équipant le poste A

Courants et tensions lors des différents types de courts-circuits

Dans ce qui va suivre, on va expliquer le fonctionnement du dispositif de protection de distance

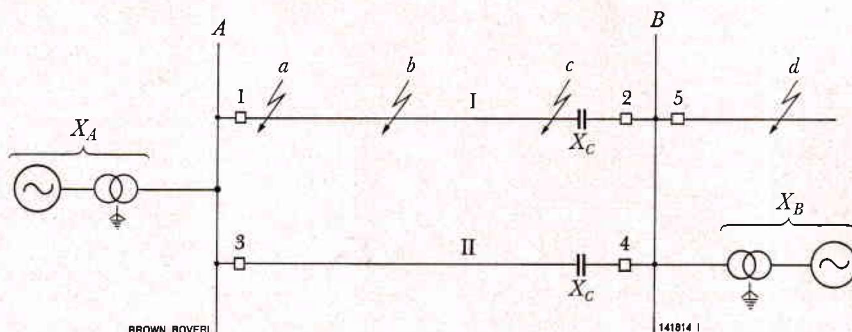


Fig. 2. – Ligne double I, II équipée de condensateurs-série

A, B = postes de transformation (équipés de relais)
1, 2, 3, 4, 5 = relais et disjoncteurs
a, b, c, d = points de défaut
X_L = réactance inductive de la ligne

X_C = réactance du condensateur (env. 0,8 · X_L)
X_A = impédance d'alimentation en aval du poste A (env. 0,75 · X_L)

X_B = impédance d'alimentation en aval du poste B (env. 2 · X_L)

Pour les explications, voir le texte.

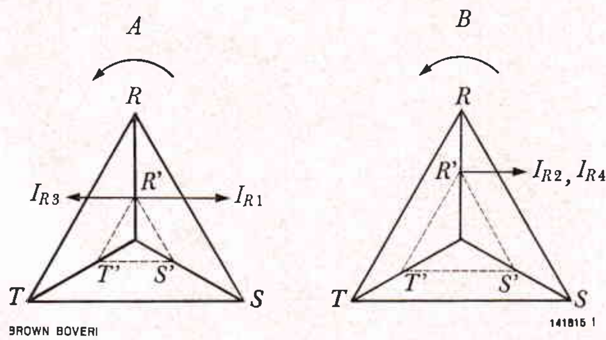


Fig. 3. – Tensions et courants, lors d'un court-circuit triphasé au point a, avant le fonctionnement de l'éclateur

à gauche: jeu de barres A
à droite: jeu de barres B
(voir également fig. 2)
R, S, T = tensions avant l'apparition du défaut
R', S', T' = tensions après l'apparition du défaut
I_{R1}, I_{R3} / I_{R2}, I_{R4} = courants de défaut circulant dans les relais 1, 3 et 2, 4

Par raison de simplicité, seuls les courants de la phase R sont représentés.

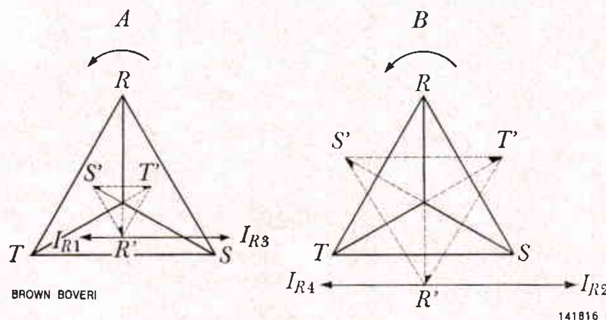


Fig. 4. – Tensions et courants, lors d'un court-circuit triphasé au point b, avant le fonctionnement de l'éclateur

Désignations comme dans la figure 3
à gauche: jeu de barres A
à droite: jeu de barres B (voir fig. 2)

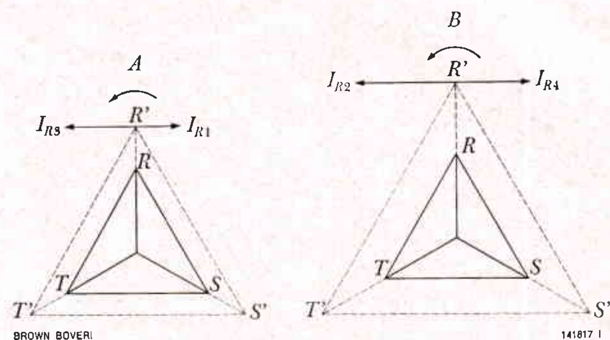


Fig. 5. – Tensions et courants, lors d'un court-circuit triphasé au point c, avant le fonctionnement de l'éclateur

Désignations comme dans la figure 3.
à gauche: jeu de barres A
à droite: jeu de barres B (voir fig. 2)

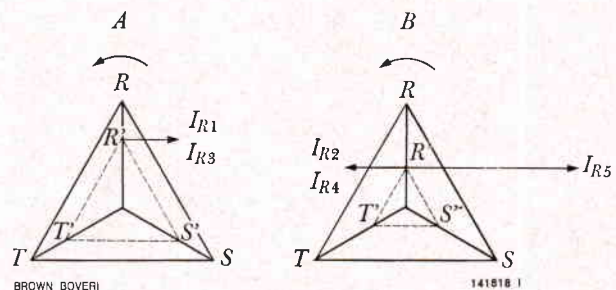


Fig. 6. – Tensions et courants, lors d'un court-circuit triphasé au point d, avant le fonctionnement de l'éclateur

Désignations comme dans la figure 3.
à gauche: jeu de barres A
à droite: jeu de barres B

dans le cas où le condensateur-série est inséré dans la ligne à proximité du poste de transformation. La figure 2 représente une ligne double, alimentée par ses deux extrémités, équipée de condensateurs-série à l'extrémité de chacun des conducteurs. Afin de pouvoir déterminer le genre de dispositif pour la protection de lignes équipées de condensateurs-série, il est nécessaire de faire une analyse complète des courants et tensions de court-circuit tout au long de la ligne considérée. Les figures 3 à 6 représentent les diagrammes vectoriels des tensions existant sur les jeux de barres omnibus A et B, ainsi que les courants traversant les relais 1, 2, 3 et 4 lors d'un court-circuit triphasé. Dans ces diagrammes, on a négligé les composantes réelles des impédances.

Lors d'un court-circuit monophasé à la terre, les conditions sont moins sévères, car la composante monophasée et la composante directe de la réactance du condensateur sont à peu près égales, alors que la réactance monophasée d'une ligne aérienne faisant partie d'un réseau mis à la terre à une valeur triple de la réactance directe, donc le condensateur à une influence plus faible sur la réactance totale jusqu'au point de défaut.

Dans les représentations vectorielles (fig. 3 à 6), on a choisi quatre points de défauts différents.

a. A proximité du poste *A*, ligne I (fig. 3).
b. A environ 40 % de la longueur totale de la ligne en partant de *A*, ligne I (fig. 4).
c. A proximité immédiate du condensateur, ligne I (fig. 5).
d. Sur une ligne partant du poste *B*, en dehors de la section de ligne protégée *A–B* (fig. 6).

Sur les diagrammes, les courants inductifs ou capacitifs sont représentés respectivement en retard ou en avance sur la force électromotrice du générateur. La puissance d'alimentation du jeu de barres omnibus a été choisie de telle sorte que, lors d'un court-circuit au point *c*, le courant de court-circuit résultant devienne capacitif. Il faut remarquer que, dans ces conditions, le courant a une valeur telle qu'un fonctionnement de l'éclateur se produit au cours de la première demi-période.

Les diagrammes des figures 3 à 6, représentant les tensions et courants, ont été tracés en admettant qu'aucune décharge à travers l'éclateur ne s'est produite. Cette hypothèse rend plus sévères les conditions de fonctionnement du relais de distance, cependant une telle analyse des faits donne une vue d'ensemble des différentes grandeurs de mesure.

Courts-circuits aux points a et d

Dans le cas de courts-circuits aux points *a* ou *d*, la réactance totale de la section de ligne *A–B* (fig. 2) reste inductive, car X_C est plus petit que la réactance de la ligne. Les tensions, apparaissant sur les jeux de barres omnibus *A* et *B* et les courants, circulant dans les relais 1, 2, 3 et 4 et même 5, ont le même sens et des grandeurs relatives équivalentes à celle apparaissant lors d'un court-circuit triphasé dans des réseaux sans condensateurs-série.

Court-circuit au point b

Lorsqu'un court-circuit triphasé se produit au point *b*, les triangles, représentant les tensions sur les jeux de barres omnibus *A* et *B*, pivotent de 180° (fig. 4). La section de la ligne I, comprise entre le jeu de barres *A* et le point de défaut, a une réactance inductive, par contre la ligne II présente, à partir de *A*, une très petite réactance capacitive. La réactance de la section, comprise entre le jeu de barres *B* et le point de défaut, est capacitive. Le courant de court-circuit total reste inductif; la distribution des courants est telle que le courant, traversant le relais 1, devient capacitif et le courant, traversant le relais 2, devient inductif. Dans le cas d'une alimentation par le poste *A* seul, la réactance de la ligne II devient nulle (avec les valeurs admises pour les réactances de la ligne et du condensateur). Il ne circule aucun courant de court-circuit à travers le relais 1. Le triangle représentant les tensions sur le jeu de barres omnibus *B* tourne de 180° et les tensions sur les barres omnibus *A* disparaissent. Le relais 1 ne dispose plus d'aucune grandeur de mesure.

Court-circuit au point c

Lorsqu'un court-circuit triphasé se produit en *c*, la réactance totale de tout le réseau, pris comme exemple, devient capacitive jusqu'au point de défaut. Les tensions, apparaissant sur les jeux de barres *A* et *B*, atteignent des valeurs supérieures à celles, existant avant le court-circuit (il n'y a pas d'inversion de sens) et le courant de court-circuit total se répartit dans les conducteurs, de telle sorte que le courant traversant le relais 1 est inductif et le courant traversant le relais 2 est capacitif. Le courant dans la ligne II est capacitif dans le sens de *A* vers *B*.

Le courant de court-circuit atteint, dans ce cas, une valeur telle, que la décharge à travers l'éclateur se produit aussitôt; le courant de court-circuit devient alors inductif. Il faut remarquer que, dans le cas d'une alimentation par le poste *A* seul, l'impédance d'alimentation en aval du relais doit être très grande (au minimum 1,6 à 2 fois l'impédance de la ligne choisie dans notre exemple), afin que le courant de court-circuit reste inductif. Cela suppose une alimentation très faible. L'apparition d'un courant capacitif présente un grand nombre de complications et de difficultés, par exemple, des effets de résonnance, et de surtension etc., qui sont à éviter dans la mesure du possible. Il est donc préférable, dans le cas de lignes parallèles ayant une puissante alimentation, de n'insérer le condensateur série que dans l'une des lignes, afin de réduire au minimum les difficultés dont on vient de parler.

Choix des grandeurs de mesure (protection principale)

On utilise, pour la mesure de l'impédance au moyen d'un relais de distance, une tension de mesure U_d, obtenue à partir des tensions et courants de défaut (par exemple, différence entre la tension de défaut et la tension apparaissant aux bornes d'une impédance image de la ligne dans le relais et parcourue par le courant de défaut) que l'on compare à une tension de référence U_r (par exemple tension d'une phase saine ou de la phase touchée par le défaut) [7, 8].

Pour un court-circuit triphasé, une mesure erronée de la direction avant la décharge à travers l'éclateur ne peut être évitée que par l'adjonction d'un circuit de mémoire au relais [9, 10, 13]. Ce circuit de mé-

moire présente de plus l'avantage d'une mesure rapide et exacte de la distance dans la demi-période qui suit la décharge à travers l'éclateur.

Dans le cas de courts-circuits assymétriques, la décision, concernant la direction, peut être faussée pour les relais des postes équipés des condensateurs-série (relais 3, 4, 5 de la fig. 2) et éventuellement pour les relais des postes éloignés (A). En effet, à l'apparition d'un défaut au point b, la direction de la tension s'inversant, il y aura mesure erronée, si l'on choisit, comme grandeur de référence, la tension de la phase touchée par le défaut. Si, par contre, on choisit la tension de la phase non touchée par le défaut comme grandeur de référence, l'interprétation correcte de la direction sera assurée dans tous les cas de courts-circuits assymétriques [13].

Fonctionnement du dispositif de protection

Après le fonctionnement de l'éclateur de protection du condensateur, les réactances mesurées par le relais de distance sont inductives; ce dernier fonctionne d'une manière sélective comme pour un réseau sans condensateur série. Le tableau I représente le sens des tensions de référence (U_r) et de mesure (U_d) aux bornes du relais, avant le fonctionnement de l'éclateur, pour les points de défaut représentés sur la figure 2. On a choisi, comme tension de référence U_r, la composante directe de la tension de la phase suivante et supposé le dispositif équipé d'un circuit de mémoire (comme cela est le cas, pour le relais de distance Brown Boveri à une période type L6 [9, 10]). Les diagrammes circulaires de déclenchement représentés en coordonnées R–X sont également visibles dans ce tableau, pour les relais de distance 1, 2, 3 et 4, et dans les différents cas.

Courts-circuits aux points a et d

Dans le cas de défauts aux points a et d, les courants et les tensions sont les mêmes, que ceux apparaissant dans un réseau fonctionnant sans condensateur-série. La direction du défaut est déterminée sans difficultés par le relais de distance.

Court-circuit au point b

Lors d'un court-circuit triphasé au point b, la tension de référence U_r est maintenue pendant quelques instants par le dispositif de mémoire. La tension de défaut s'inverse et agit dans le sens du déclenchement. Par contre la différence de potentiel due au courant, circulant dans le relais 1, agit dans le sens du verrouillage (fig. 4). La tension de mesure U_d n'agit dans le sens du déclenchement que lorsque la tension de défaut surpasse la différence de potentiel, dûe au courant, c'est-à-dire le relais 1 déclenche pour toutes les impédances de défaut situées à l'extérieur du cercle représentant la limite de déclenchement. Il y a donc permutation des zones de déclenchement et de verrouillage par rapport au fonctionnement normal [11, 12]. A la fin du temps, pendant lequel la mémoire agit, la tension de référence change de sens et le fonctionnement du relais redevient de nouveau normal, c'est-à-dire il déclenche pour des impédances, situées à l'intérieur du cercle, la tension de défaut agissant à présent dans le sens du verrouillage.

Le relais 2 déclenche grâce au maintien par la mémoire de la tension de référence. A la fin du temps de mémoire, le relais aura tendance à verrouiller, à cause du changement de sens de cette tension. Le relais 3 agit de la même manière, il déclenche pendant le temps de mémoire, puis verrouille ensuite.

Si l'impédance image est réglée à une valeur plus élevée que la réactance présentée par le condensateur, le relais 4 est verrouillé au début du court-circuit et ne déclenche qu'après la fin du temps de mémoire. Son fonctionnement est inverse dans le cas où le réglage de l'impédance image a une valeur plus faible que la réactance du condensateur par exemple $0{,}85 \cdot (X_L - X_C)$. Ce genre de fonctionnement est également valable pour le relais 5 si le courant de court-circuit circulant à travers celui-ci est assez important.

Pour un court-circuit monophasé au point b, l'effet mentionné ci-dessus (permutation des zones de déclenchement et de verrouillage) ne se présente pas pour le relais 1 ; en effet, la réactance homopolaire de la ligne est plus grande que la réactance directe, tandis que les impédances homopolaire et directe sont du même ordre de grandeur pour le condensateur. C'est pourquoi la baisse de la tension de la phase touchée est un peu plus faible que dans le cas d'un court-circuit triphasé, mais elle ne s'inverse pas. La composante homopolaire de l'impédance de défaut reste inductive; il s'en suit une répartition normale des courants de court-circuit dans ce circuit.

La différence des rapports des impédances homopolaires et directes de la ligne et du condensateur a pour résultat un courant très faible dans la phase comprenant le défaut, comparé aux courants de compensation, circulant dans les phases non touchées de la ligne (ligne I). Cependant les tensions des phases non touchées ne baissant pas autant que celle de la phase comprenant le défaut, il faut s'attendre à ce que les relais, branchés sur ces phases, présentent de légers défauts de sélectivité au déclenchement.

Les relais 2 et 3 sont en mesure de déclencher selon leur réglage. Le relais 4 verrouille seulement dans le cas où la chute de tension du courant image de la ligne est supérieure à la tension de défaut. Le réglage du relais sur une impédance plus élevée permet d'obtenir un tel fonctionnement.

Court-circuit au point c

Pour un court-circuit triphasé sur la ligne I, à proximité immédiate du condensateur, le relais 1 ne déclenche, que si le réglage de l'impédance image de la ligne a une valeur assez élevée (au moins 1,1 fois la valeur de la réactance de la section de ligne). Les relais 2 et 3 ne déclenchent pas, car le courant, traversant le relais 2, est capacitif et la chute de tension aux bornes de l'impédance image du courant, est dirigée dans le sens du verrouillage. Par contre le relais 4 détecte une impédance de défaut tombant à tort dans sa zone de déclenchement (pour un réglage supérieur à X_C). Il est donc nécessaire de verrouiller, dans ces conditions, le relais 4 jusqu'au fonctionnement de l'éclateur de protection du condensateur-série.

Un court-circuit sur la ligne I, se produisant entre le condensateur-série et le jeu de barres omnibus, a les mêmes effets qu'un défaut se produisant au point *d* lorsque celui-ci se trouve à proximité du jeu de barres *B*. Dans ce cas le comportement des relais 1, 3 et 4 est le même que dans le cas d'un défaut au point *d* tandis que le relais 2 déclenche et le relais 5 verrouille.

Relais de distance à plusieurs stades (protection de réserve)

Lorsqu'un relais à plusieurs stades n'est pas équipé d'un dispositif de mémoire, on peut comparer son fonctionnement à celui décrit dans le tableau I, après disparition de la tension de référence (mémoire).

Fonctionnement du dispositif de démarrage, pour la mesure de l'impédance, d'un relais de distance

Un relais à minimum d'impédance sert de dispositif de démarrage au relais de distance, à plusieurs stades, pour la protection de lignes à haute tension. Ces relais peuvent être compoundés ou non. Dans le cas d'un relais compoundé, on soustrait de la tension, existant sur les barres omnibus, une tension proportionnelle au courant, circulant dans le sens des barres vers la ligne de transport. La figure 7 représente les caractéristiques de fonctionnement d'un tel relais dans le plan *R–X*. Son réglage doit être fait de telle sorte que d'une part, il ne réagisse pas pour la charge maximale et que d'autre part, il réagisse avec certitude à l'apparition d'un court-circuit.

Le fonctionnement d'un tel relais de démarrage, dans le cas des défauts représentés par les figures 2 à 6, est visible sur le tableau II. Pour un court-circuit au point *b*, la ligne II supporte un courant plus important, circulant du poste *A* vers le point de défaut, que la ligne I; le courant, traversant le relais 1, est donc capacitif. Ce dernier mesure, dans ce cas, une impédance légèrement plus élevée que le relais 3. Le relais 4 mesure une impédance plus élevée que le relais 2, à cause de l'alimentation par le poste *B*. Pour un relais de démarrage compoundé, la tension de compoundage agit dans le même sens que les tensions entre barres pour les relais 3 et 2; c'est pourquoi les impédances mesurées par ces relais sont un peu plus élevées que dans la réalité. En général, il est cependant possible d'effectuer un réglage à une valeur assez élevée pour que tous les relais réagissent à l'apparition d'un court-circuit sur la section protégée.

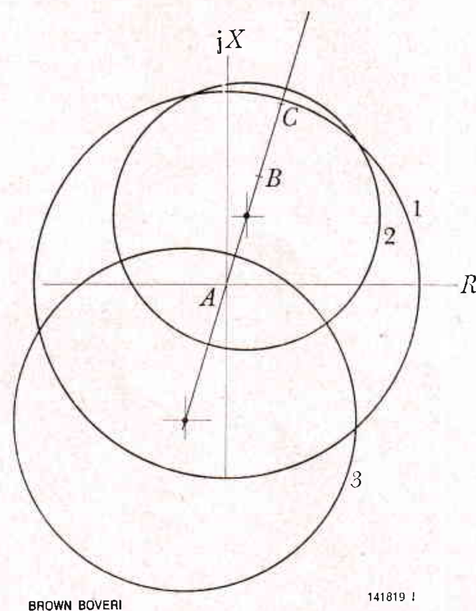


***Fig. 7.** – Caractéristiques de déclenchement d'un relais à minimum d'impédance dans un réseau ne comprenant pas de condensateur-série*

A, B, C = postes de transformation de la ligne
1 = caractéristique d'un relais non compoundé
2 = caractéristique d'un relais compoundé
3 = caractéristique du relais, employé comme relais de verrouillage, pour un «dispositif de protection de distance à comparaison de directions avec transmission d'un signal de verrouillage»

TABLEAU I

Tableau récapitulatif du mode de fonctionnement du relais de distance dans les cas des défauts aux points a, b, c et d
(avant amorçage de l'éclateur de protection du condensateur série)

Point de défaut	Type de défaut	Relais 1				Relais 2				Relais 3				Relais 4				
		Direction		Caractéristique de déclenchement, diagramme R-X		Direction		Caractéristique de déclenchement, diagramme R-X		Direction		Caractéristique de déclenchement, diagramme R-X		Direction		Caractéristique de déclenchement, diagramme R-X		
		U_r	U_d			U_r	U_d			U_r	U_d			U_r	U_d			
a	Triphasé avec disparition différée de la tension de référence				+ (+)				+ (+)				− (−)				+ (−)	Non
	Triphasé après disparition de la tension de référence				+ (+)				+ (−)				− (−)				+ (−)	Non
	Monophasé à la terre				+ (+)				+ (−)				− (−)				+ (−)	Non
b	Triphasé avec disparition différée de la tension de référence				− (+)				+ (+)				+ (+)				* − (+)	Oui
	Triphasé après disparition de la tension de référence				+ (−)				− (−)				− (−)				+ (−)	Oui
	Monophasé à la terre				+ (−)				+ (+)				+ (−)				− (−)	Non
c	Triphasé avec disparition différée de la tension de référence				+ (−)				− (−)				− (−)				+ (−)	Oui
	Triphasé après disparition de la tension de référence				+ (−)				− (−)				− (−)				+ (−)	Oui
	Monophasé à la terre				+ (−)				− (−)				− (−)				+ (−)	Oui
d	Triphasé avec disparition différée de la tension de référence				+ (−)				− (−)				+ (−)				− (−)	Non
	Triphasé après disparition de la tension de référence				+ (−)				− (−)				+ (−)				− (−)	Non
	Monophasé à la terre				+ (−)				− (−)				+ (−)				− (−)	Non

BROWN BOVERI 141854 lf

TABLEAU II

Fonctionnement des dispositifs de démarrage, pour la mesure de l'impédance, d'un relais de distance à plusieurs stades assurant la protection d'une ligne double, équipée de condensateurs-série (fig. 2), pour des courts-circuits se produisant aux points a, b, c et d représentés sur les figures 3 à 6

Significations: + réaction   – pas de réaction

Point de défaut	Relais non compoundés				Relais compoundés			
	Relais 1	Relais 2	Relais 3	Relais 4	Relais 1	Relais 2	Relais 3	Relais 4
a	+	+	+	+	+	+	+	+
b	+	+	+	+	+	–	+	+
c	+	+	+	–	+	–	–	+
d	+	+	+	+	+	+	+	+

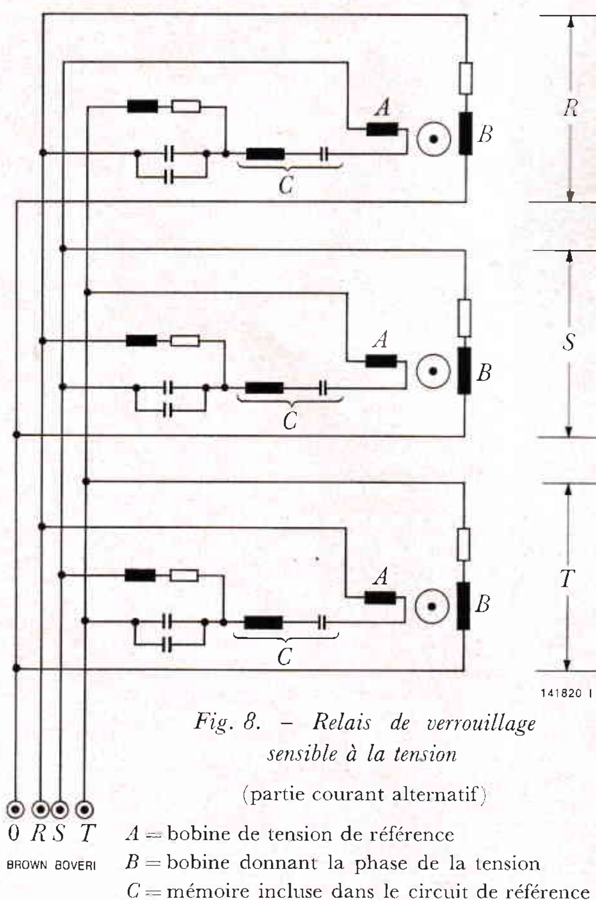


Fig. 8. – Relais de verrouillage sensible à la tension

(partie courant alternatif)

A = bobine de tension de référence
B = bobine donnant la phase de la tension
C = mémoire incluse dans le circuit de référence

◄ *Explication du tableau I*

U_r = tension de référence
U_d = tension de mesure
↖ = direction de la tension de référence (U_r) et de la tension de mesure (U_d), lorsque le premier stade est réglé à une valeur, ne tenant pas compte de la réactance du condensateur
↗ = direction de la tension de mesure (U_d), lorsque le premier stade est réglé à une valeur, tenant compte de la réactance du condensateur [par exemple $0.85 \cdot (X_L - X_C)$]

+ = déclenchement, – = verrouillage: du relais de distance, lorsque le premier stade est réglé à une valeur, ne tenant pas compte de la réactance du condensateur

(+) = déclenchement, (–) = verrouillage: du relais de distance, lorsque le premier stade est réglé à une valeur, tenant compte de la réactance du condensateur [$0,85 \cdot (X_L - X_C)$]

Le relais déclenche, lorsque l'angle entre U_r et U_d est compris entre 180° et 360° dans le sens positif.

* Lors d'une alimentation par une extrémité seulement, le relais 4 ne verrouille que dans le cas où la valeur de la réactance image réglée est supérieure à la réactance du condensateur.

Remarque:

Dans ces diagrammes circulaires (courbes limites), la partie du cercle-limite située dans les deuxième et troisième quadrants n'a pas de signification pratique (pour les courts-circuits considérés), car il n'apparaît pas de composante résistive négative ($-R$) dans l'impédance de défaut de la ligne de transport. Le secteur, formant le quatrième quadrant contient les composantes X de l'impédance de défaut qui ont une réactance capacitive.

Dans le cas d'un défaut en *c*, le courant de court-circuit total est capacitif et le courant de la ligne I, traversant le relais 1, inductif. La tension de compoundage s'additionne à la tension du jeu de barre pour les relais 3 et 2 et se retranche pour le relais 4. C'est pourquoi il se peut que les deux premiers relais ne réagissent pas. Cependant, l'éclateur de protection du condensateur réagit immédiatement et il n'y a qu'un faible retard d'entrée en action des relais 3 et 2 ce qui est négligeable pour un dispositif de réserve.

Relais de verrouillage de la tension

Comme on l'a dit ci-dessus, les relais 4 et 5 n'agiraient pas d'une manière sélective lors d'un court-circuit, se produisant en aval du condensateur sur la ligne I, car la réactance, vue par le jeu de barres omnibus *B* en direction du point de défaut, est capacitive (défaut aux points c ou d, fig. 2) si la réactance image du relais était assez petite. Cela est également vrai pour le relais 2, pour un défaut sur la ligne II. Dans ces cas, il est nécessaire de verrouiller ces relais jusqu'au fonctionnement de l'éclateur.

On reconnaît un défaut, apparaissant en aval du condensateur, au fait que la tension de la phase touchée s'inverse avant le fonctionnement de l'éclateur. On utilise cette particularité pour exciter un relais de verrouillage de la tension. Ce relais est un relais de produit fonctionnant suivant le principe de Ferraris. Une de ses bobines est alimentée par la tension de phase et l'autre par la composante directe de la tension composée. Ce relais réagit, lorsque l'une des tensions de phase s'inverse. Afin de détecter également des courts-circuits asymétriques, le relais est branché sur les trois phases. Le verrouillage de sécurité, pour un court-circuit triphasé, est obtenu au moyen d'un montage à mémoire du circuit de référence. La figure 8 représente le circuit d'un tel relais. Lors d'un court-circuit en aval du condensateur, ce relais agit et verrouille les relais 2, 4 et 5 (voir fig. 2). Après le fonctionnement de l'éclateur, ce relais retombe, par suite du retour à la normale du sens des tensions, les relais 2, 4 et 5 sont donc libérés.

Choix des dispositifs de protection à verrouillage réciproque des relais branchés aux deux extrémités d'une ligne

Comme on peut le voir dans le tableau I, les relais de direction ordinaires ne sont pas en mesure de sélectionner la direction correcte dans certains cas, à cause de l'inversion des tensions apparaissant sur les jeux de barres omnibus. Le dispositif de protection choisi doit également être un dispositif de protection rapide pour la section de ligne protégée, ainsi que pour les sections de ligne situées à proximité immédiate. Du tableau I, il ressort également qu'un déclenchement sélectif du dispositif de protection ne peut être assuré que si les deux relais d'extrémité de la ligne sont verrouillés réciproquement.

Dans la suite, on va décrire un dispositif de protection, utilisant le relais de distance, Brown Boveri à une période, comme protection principale et un relais de distance, à plusieurs stades comme protection de réserve.

Circuit de base

Il n'est pas possible d'utiliser les dispositifs de protection énumérés dans la bibliographie [14], pour la protection d'une ligne, équipée d'un condensateur-série assurant un degré élevé de compensation et monté à proximité immédiate d'un poste de transformation.

Le dispositif de protection à «télécommande de déclenchement indirecte, avec contrôle du signal à la réception», le plus souvent employé, ne peut être utilisé ici pour les raisons suivantes:

- En effet, pour tenir compte de la réactance du condensateur, qui compense en grande partie la réactance directe de la ligne, il faut réduire la portée du premier stade pour des courts-circuits isolés à une valeur inférieure à la réactance de la ligne en tenant compte de la réactance du condensateur, par exemple $0{,}85 \cdot (X_L - X_C)$. Il est donc possible que, pour des courts-circuits multipolaires éclatant sur la section de ligne (par exemple un défaut au milieu de la ligne), le déclenchement ne puisse être assuré dans le temps voulu.
- Lors d'un court-circuit aux points *b* ou *c* (fig. 2) sur la ligne I, le relais 4 déclencherait de manière non sélective, avant même la fin du temps de mémoire, si la réactance image de consigne n'était pas plus grande que la réactance du condensateur (voir tableau I). Le signal transmis provoque l'ouverture du disjoncteur 3 du poste opposé. En conséquence, la ligne II est déclenchée à tort pour un défaut se produisant sur la ligne I.

De même le dispositif de protection à «comparaison de directions avec transmission d'un signal de verrouillage» n'est également pas applicable pour la raison suivante:

- Lors d'un défaut au point *b* (fig. 2) le dispositif de verrouillage du relais 4 (relais à minimum d'impédance compoundé, fig. 7) n'agirait pas, à cause de l'inversion de la tension sur les barres omnibus, qui agissent alors dans le sens du déverrouillage dans le circuit de compoundage. Aucun ordre de verrouillage n'est émis en direction du relais 3 du poste *A*. En conséquence, la ligne II est déclenchée à tort pour un défaut se produisant sur la ligne I.

Par contre, le dispositif de protection, à relais de distance, avec comparaison du sens des impédances et émission d'un signal d'autorisation préalable se prête très bien à la protection de lignes équipées d'un condensateur série à une extrémité.

Il faut remarquer que, lors d'un court-circuit aux points *b* et *c*, le déclenchement de la ligne ne se réalise que lorsque le condensateur est court-circuité par le fonctionnement de l'éclateur. Cependant un déclenchement, non sélectif de la ligne saine est évité. Lors d'un court-circuit en *b* les courants dans les relais 1 et 2 sont respectivement capacitifs et inductifs. Cette distribution des courants obéit aux lois physiques.

Les autres systèmes de protection sont soumis aux mêmes conditions et ne peuvent agir avant le fonctionnement de l'éclateur de protection; cela est vrai pour le dispositif de protection à comparaison de phases où le dispositif à comparaison de directions. Cependant, le fonctionnement de l'éclateur étant certain, le défaut est éliminé avec environ un

retard d'une demi-période seulement. De toute façon, il faut prendre les mesures nécessaires pour que, même lorsqu'une extrémité de l'une des lignes reste ouverte, une protection rapide soit assurée en cas de court-circuit.

Protection de réserve

On conseille d'employer, comme dispositif de protection de réserve, un relais de distance à plusieurs stades. Le premier stade est réglé sur une réactance plus faible (en tenant compte de la réactance du condensateur) que pour le dispositif de protection principale. Le signal haute fréquence en provenance du poste opposé est également utilisé pour étendre le premier stade de ce relais à toute la section de ligne, lorsque le condensateur est court-circuité (déclenchement interdépendant à accélération de stade [14]). Les second et troisième stades de ce relais sont des stades de réserve, pour les barres omnibus du poste opposé et les sections de lignes adjacentes.

En cas de panne de la transmission haute fréquence, les défauts sont détectés dans la première partie de la ligne (environ $^1/_3$ de la section à partir de chaque poste de transformation) pendant le temps de base. Tous les autres défauts sont éliminés par déclenchement par le deuxième stade du relais de distance à plusieurs stades, la réserve est donc assurée à 100 %.

Relais de verrouillage de la tension

On emploie ce relais de verrouillage de la tension dans des postes situés à proximité du condensateur série. Celui-ci est utilisé pour:

- verrouiller le relais de distance du poste jusqu'à court-circuitage du condensateur par le fonctionnement de l'éclateur;
- le déclenchement d'urgence et de secours des disjoncteurs, qui sont installés à l'extrémité de la ligne, où est monté le condensateur, au cas où le fonctionnement de l'éclateur (détectable, du fait que les tensions reprennent leur sens normal) ne se produirait pas dans un intervalle de 1 à 2 périodes.

Après ce déclenchement, le relais situé à l'autre extrémité de la ligne peut déclencher pendant le temps de base ou pendant la période de fonctionnement du deuxième stade, le réseau étant à nouveau inductif. Ce dispositif de protection est représenté à la figure 9.

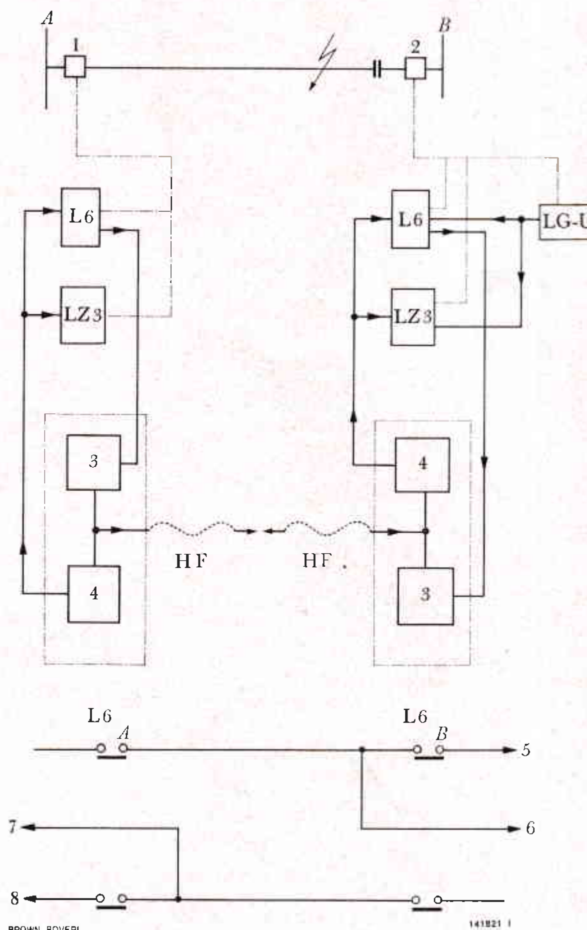


Fig. 9. – Comparaison de directions avec transmission d'un signal d'autorisation préalable

(Système à autorisation préalable)

A, *B* = postes de transformation
1, 2 = disjoncteurs
3 = émetteur
4 = récepteur
5 = vers la commande d'ouverture des disjoncteurs du poste *B*
6 = vers la commande de déclenchement interdépendant à accélération de stade du LZ 3 du poste *B*
7 = vers la commande de déclenchement interdépendant à accélération de stade du LZ 3 du poste *A*
8 = vers la commande d'ouverture des disjoncteurs du poste *A*
L6 = relais de distance, à une période avec mémoire (premier stade)
LZ 3 = Relais de distance à plusieurs stades (protection de réserve)
LG-U = Relais de verrouillage de la tension

Temps de déclenchement

Les dispositifs de protection pour lignes de transport, équipées de condensateurs-série, ont les temps de réaction suivants:

- Dispositif de protection de base avec mémoire: environ 1 période + temps de transmission haute fréquence

- Dispositif de protection rapide de réserve (déclenchement interdépendant à accélération de stade du relais de distance à plusieurs stades) :
  environ 2 périodes + temps de transmission haute fréquence.
- Dispositif de protection de réserve, la transmission haute fréquence étant en panne.
  Pour des défauts à proximité du poste (env. $^{1}/_{3}$ de la longueur de la ligne) :
  2 à 3 périodes

  Défauts au milieu de la ligne :
  Réaction du second stade du relais de distance à plusieurs stades.

Conclusion

Les condensateurs, assurant un degré élevé de compensation de la réactance d'une ligne, rendent plus sévères les conditions de fonctionnement des relais de distance, particulièrement lorsqu'ils sont couplés à la ligne, au début de celle-ci, à proximité du poste de transformation. Il est cependant possible d'assurer une protection rapide et sélective pour de telles lignes, par l'emploi d'un relais de distance à mémoire, par l'utilisation, comme tension de référence, de la tension d'une phase saine, par l'adjonction d'un relais de verrouillage de la tension et par la transmission des ordres en haute fréquence.

(B.T.) VENKAT NARAYAN

Bibliographie

[1] E.C. STARR et R.D. EVANS: Series Capacitors for Transmission Circuits. *Trans. A.I.E.E.*, vol. 61 (1942), p. 963 à 973.

[2] J.W. BUTLER, J.E. PAUL et T.W. SCHROEDER: Steady State and Transient Stability Analysis of Series Capacitors in long Transmission Lines. *Trans. A.I.E.E.*, vol. 62 (1943), p. 58 à 65.

[3] C. DE BENNETOT, G. JACQUETY et J. LAMY: Choix d'une batterie de condensateurs-série et problèmes posés par son installation dans un poste de transformation. *CIGRE* 1960, rapport n° 303.

[4] H. BARCHETTI, W. FREY et G. KÖPPL: Interrupteurs rapides du type DYLF pour tensions de 72,5 à 750 kV: Possibilités d'emploi en rapport avec la technique de la protection. *Rev. Brown Boveri*, t. 55 (1968), n° 4/5, p. 188 à 201.

[5] E.L. HARDER, J.E. BARKLE et R.W. FERGUSON: Series Capacitors during Faults and Reclosing. *Trans. A.I.E.E.*, vol. 70 (1951), p. 1627 à 1641.

[6] M. MÜLLER: La protection des lignes à très haute tension contre les courts-circuits. *Rev. Brown Boveri*, t. 41 (1954), n° 9, p. 345 à 350.

[7] H. BARCHETTI: Un nouveau relais de distance pour les réseaux à haute tension. *Rev. Brown Boveri*, t. 35 (1966), n° 11/12, p. 776 à 783.

[8] P. WEBER et A. MATTHEY-Doret: Le nouveau relais de distance, type LI 4 avec applications multiples pour réseaux à moyenne tension. *Rev. Brown Boveri*, t. 53 (1966), n° 11/12, p. 762 à 775.

[9] F. GYGAX, M. MÜLLER, C. HAHN et P. BALTENSPERGER: La protection des longues lignes de réseaux à très haute tension, avec application de la coupure et de la refermeture unipolaires. *Rev. Brown Boveri*, t. 45 (1958), n° 6, p. 243 à 253.

[10] C. HAHN: Dispositifs de protection et relais pour lignes à très haute tension. *Rev. Brown Boveri*, t. 51 (1964), n° 1/2, p. 93 à 100.

[11] KALERVO NURMIMÄKI: Distanzschutz bei Starkstromleitungen mit Reihen-Kondensatoren. *Voima Ja Valo* (Helsinki), 1963, n° 1.

[12] H. UNGRAD: Probleme bei der Disposition statischer Schutzrelais. *Thèse* soutenue à Vienne en 1966.

[13] A. MATTHEY-DORET: Protection des lignes et des câbles. Caractéristiques principales et utilisation. *Rev. Brown Boveri*, t. 53 (1966), n° 11/12, p. 834 à 840.

[14] J. GANTNER: Différents modes de couplage du dispositif de protection de distance Brown Boveri, avec transmission d'un signal au poste de transformation opposé. *Rev. Brown Boveri*, t. 55 (1968), n° 7, p. 365 à 371.

Equipements électriques pour installations de manutention modernes

621.86/.87-83

Les progrès réalisés dans l'automatisation des installations de manutention exigent de plus en plus l'emploi de dispositifs d'entraînement, de commande et de régulation spécialisés. L'exposé suivant se propose de donner quelques exemples de tels équipements, faisant parties du programme de fabrication de la Société Brown Boveri. On décrira leur fonctionnement, ainsi que leur emploi dans des cas spéciaux.

Lors de l'établissement de projets d'équipements électriques pour installations de manutention, se pose le problème du calcul de l'entraînement, de sa commande et de sa régulation, auquel vient s'ajouter celui du traitement des informations dans le cas d'installations automatiques. Pour pouvoir trouver une solution à ce problème, il est nécessaire de connaître exactement les conditions d'exploitation, auxquelles doit satisfaire cet équipement électrique. En outre, les parties électriques de telles installations de manutention doivent présenter la solution optimale du point de vue technique et économique. Dans ce qui va suivre, nous allons décrire quelques exemples, choisis parmi un grand nombre de dispositifs d'entraînement, de commande et de régulation, à savoir:

- des exécutions spéciales de moteurs triphasés à cage d'écureuil
- un régulateur électronique à thyristors pour la commande de moteurs triphasés (domaine de la régulation)
- des registres et des mémoires à décalage (domaine du traitement des informations).

Exécutions spéciales de moteurs triphasés à cage d'écureuil employées comme entraînements d'installations de manutention et de levage

En principe, on peut utiliser pour ces usages des moteurs à courant continu ou à courant alternatif.

Dans la plupart des cas, on dispose de courant alternatif (en général 380 V, 50 Hz) comme source d'énergie et, sauf exceptions, le moteur à courant continu est compliqué et plus cher à l'achat et à l'entretien. On donne donc la préférence au moteur triphasé à cage d'écureuil, simple, robuste et sûr. Ses avantages sont: l'absence de balais, de bagues et de résistances rotoriques, la simplicité des contacteurs, un encombrement réduit ainsi qu'une économie de frais d'installation et d'entretien.

La Société Brown Boveri dispose, dans son programme de fabrication, d'une exécution spéciale d'un moteur triphasé à cage d'écureuil, le type RMa (fig. 1), qui a été spécialement conçu pour satisfaire aux exigences des installations de manutention. Ce moteur est du type entièrement fermé (protection P 33), protégé contre la poussière et les projections d'eau latérales par sa carcasse en fonte à nervures circulaires, faisant office de radiateur. Une construction spéciale du rotor a permis d'obtenir une forme aplatie de la courbe de couple (fig. 2), donnant un fonctionnement souple dans toute la plage des vitesses. Cette forme de la courbe, du couple en fonction de la vitesse, empêche le moteur de décrocher lors d'une surcharge brusque et permet une bonne adaptation de celui-ci au couple demandé.

Un courant de démarrage, égal à environ la moitié du courant de démarrage d'un moteur à cage d'écureuil normal de même puissance, est une conséquence heureuse de la forme spéciale donnée au rotor.

Il est nécessaire d'étudier avec soin le problème d'échauffement lors de l'emploi de moteurs à cage d'écureuil pour des entraînements, devant exécuter de nombreux démarrages. L'accélération et le freinage fréquents de masses importantes entraînent un échauffement dépendant du produit $GD^2_{kpm} \cdot Z$ (produit de la masse totale à entraîner par le nombre de manœuvres par heure, également appelé nombre d'accélération B). Il faudra tenir compte de cet échauffement, lors du calcul du moteur. En effet le moteur à cage d'écureuil n'a pas la possibilité, comme le moteur à bagues de faire dissiper, par des résistances extérieures, une partie de la chaleur engendrée par les pertes rotoriques. La totalité de la chaleur due aux accélérations et aux freinages devra être rayonnée par la carcasse.

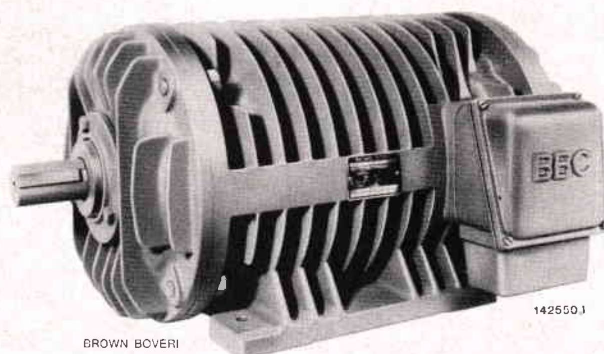


Fig. 1. – Moteur triphasé, à cage d'écureuil, type RMa

L'échauffement du moteur dépend également du mode d'exploitation. Dans le cas du freinage en contre-courant, depuis la vitesse de rotation nominale jusqu'à l'arrêt, suivi d'une nouvelle accélération, il apparaît un dégagement de chaleur environ 3,5 fois supérieur à celui dû à l'accélération depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse de rotation nominale. Dans ce cas il faudra multiplier le nombre de démarrages horaires Z par 3,5 si chaque démarrage est suivi d'un freinage en contre-courant. Malgré tous les moyens mis en œuvre, le moteur à cage d'écureuil est limité par son échauffement pour des installations de grande puissance ayant un nombre élevé de démarrages.

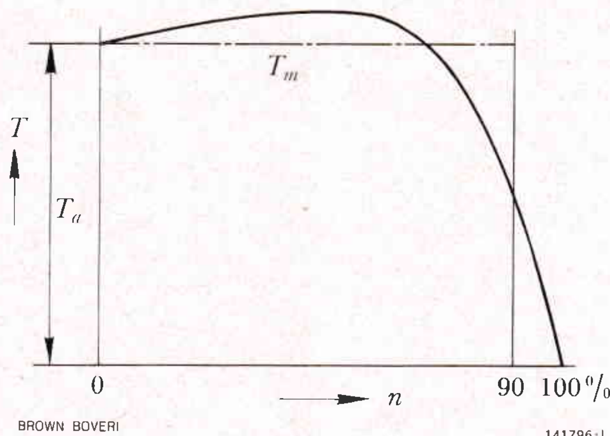


Fig. 2. – Courbe représentative du couple en fonction de la vitesse de rotation d'un moteur triphasé à cage d'écureuil, type RMa

T = couple moteur
T_a = couple de démarrage
T_m = couple moyen pendant la montée en vitesse
n = vitesse de rotation

Dans ces cas, il faudra recourir à d'autres mesures telles que la répartition de la puissance exigée sur plusieurs moteurs, ou bien l'emploi de moteurs à pôles commutables afin de satisfaire à ces exigences élevées.

Le choix du moteur triphasé, à cage d'écureuil, type RMa se fait en fonction du nombre d'accélérations admissibles B et du couple maximal T_a, qui sera déterminé pour chaque cas particulier. Par exemple, pour l'emploi d'un tel moteur pour l'entraînement d'un train de rouleaux, on prendra comme couple maximal, le couple pour lequel les rouleaux ne glissent pas encore sous les blocs de métal à laminer, pendant leur accélération.

A partir des valeurs calculées de la vitesse de rotation, du couple de démarrage, du nombre d'accélérations et du temps d'enclenchement relatif, il est possible de choisir dans les tableaux, le type de moteur convenant pour chaque cas particulier. Nous disposons, pour des applications aux appareils de levage, d'une exécution spéciale très intéressante d'un «*moteur triphasé, à cage d'écureuil, à triple commutation des pôles*, présentant une vitesse de fonctionnement très réduite» (fig. 3).

On demande souvent trois vitesses de fonctionnement pour les appareils de levage et de manutention ayant à effectuer un nombre élevé de manœuvres. Ces trois vitesses de fonctionnement sont: une vitesse élevée pour les déplacements de grande longueur, une vitesse moyenne pour les petits déplacements et une vitesse faible pour les manœuvres de positionnement et de correction.

Le moteur, à cage d'écureuil, à triple commutation des pôles, remplit bien ces conditions et de plus il présente l'avantage d'avoir des pertes au démarrage et au freinage inférieures. En effet, pendant le démarrage du moteur, la moitié de l'énergie empruntée au réseau est transformée en chaleur. Tandis que la puissance mécanique fournie augmente à partir de zéro, proportionnellement à sa vitesse de rotation; le moteur absorbe, pendant le démarrage, la totalité de la puissance électrique. Comme le montre le diagramme (fig. 4), la puissance perdue, lors du démarrage ou même lors du freinage, est réduite de plus de la moitié dans le cas de ce moteur à commutation des pôles.

La commutation des pôles, dans un moteur triphasé, peut se faire, soit par des enroulements distincts soit au moyen d'un couplage dit de Dahlander. Afin d'obtenir un couple de démarrage doux, égal à environ 0,7 fois le couple nominal, le nombre de paires de pôles inférieur est couplé en étoile. Il est ainsi possible d'obtenir des caractéristiques de vitesse de rotation en fonction du couple, analogues à celles des moteurs à bagues, équipés de résistances rotoriques.

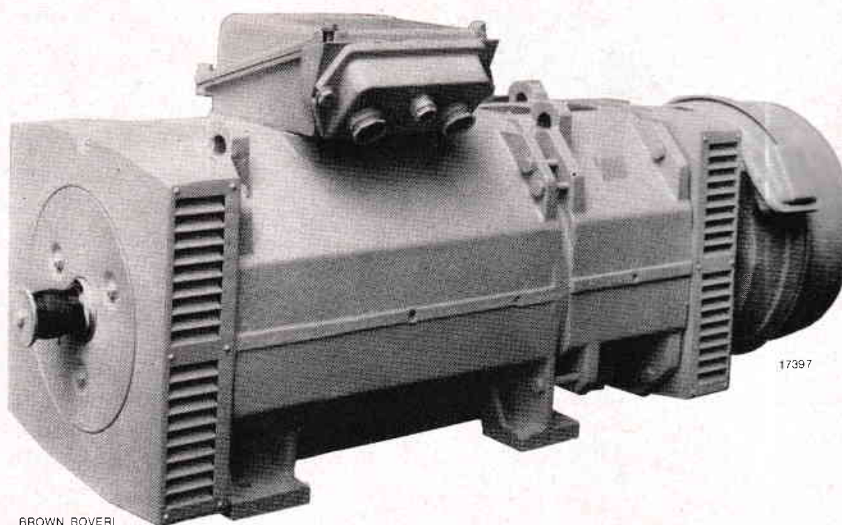


Fig. 3. – Moteur triphasé, à cage d'écureuil, à triple commutation des pôles, disposant d'une vitesse de rotation particulièrement faible

Le moteur triphasé Brown Boveri, à triple commutation des pôles, réunit dans une carcasse deux stators et deux rotors. L'un des stators supporte les enroulements commutables, formant deux ou quatre pôles pour la marche rapide et normale (3000 t./min et 1500 t./min), tandis que l'autre stator supporte l'enroulement à 24 pôles pour la marche lente (250 t./min). L'emploi de deux enroulements pour la commutation des pôles rend possible grâce au couplage de Dahlander, l'obtention d'une quatrième vitesse de rotation. Selon les besoins, les moteurs ont une carcasse ouverte ou fermée, leur propre ventilation ou une ventilation séparée. Tous les moteurs sont équipés d'un frein.

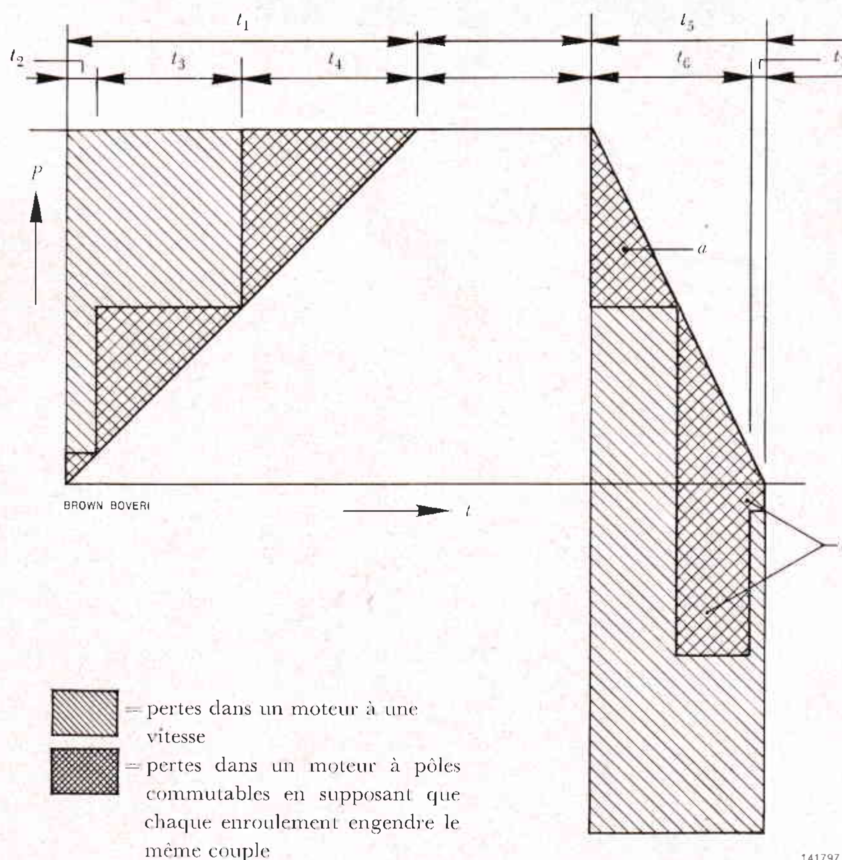


Fig. 4. – Comparaison des pertes au démarrage et au freinage d'un moteur, disposant d'une commutation des pôles, à celles d'un moteur à une vitesse

P = puissance
t = temps
t_1 = temps total de monté en vitesse
t_2 = temps de montée en vitesse, couplage à 24 pôles
t_3 = temps de montée en vitesse, couplage à 4 pôles
t_4 = temps de montée en vitesse, couplage à 2 pôles
t_5 = temps de freinage total
t_6 = temps de freinage, couplage 4 pôles
t_7 = temps de freinage, couplage 24 pôles
a = freinage à vitesse hypersynchrone
b = freinage en contre-courant

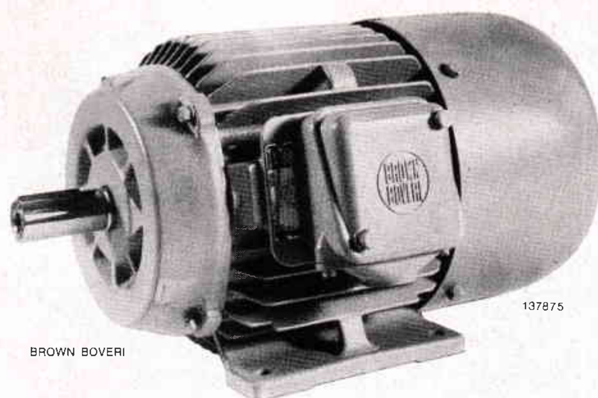


Fig. 5. – Moteur-stop triphasé sur pieds, exécution fermée B 3, à ventilation extérieure

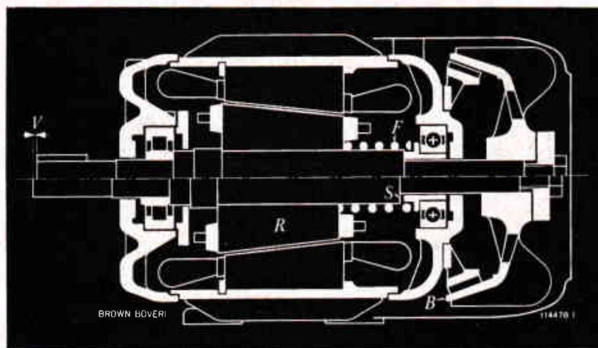


Fig. 6. – Coupe schématique d'un moteur-stop

B = frein *R* = rotor
F = ressort *S* = épaulement de l'arbre
V = glissement de 1 à 4 mm
Partie supérieure de la coupe: Moteur en service, frein desserré
Partie inférieure de la coupe: Moteur hors service, frein serré

Les *moteurs-stop et les bimoteurs-stop* sont d'autres exécutions spéciales du moteur triphasé à cage d'écureuil (fig. 5).

Le moteur-stop est issu de l'association d'un moteur triphasé, à cage d'écureuil, à rotor conique pouvant se déplacer axialement, et d'un frein mécanique à ressorts.

La figure 6 montre le principe de fonctionnement d'un moteur-stop. A l'enclenchement du moteur, une force électromagnétique axiale, due à la forme conique du stator et du rotor, pousse ce dernier en direction du côté opposé à l'entraînement en vainçant la force du ressort de freinage *F*. Le disque de frein *B*, emmanché sur l'arbre, est donc libéré de la partie fixe du frein et le moteur peut tourner librement. Lorsque l'alimentation du moteur est coupée, le champ électromagnétique et la force axiale disparaissent; le ressort *F* pousse le rotor et l'arbre vers le côté entraînement et le disque contre les garnitures de freinage. Le couple de freinage, compris entre 1,5 et 2,4 fois le couple nominal, suivant la force exercée par le ressort, ralentit énergiquement les masses en rotation. Le choix du ressort permet d'adapter le couple de freinage aux différentes exigences. Une vis de réglage rend possible le rattrapage du jeu dû à l'usure des garnitures de freinage.

Le système de freinage, décrit ci-dessus, n'exige pas de releveur de frein (électro-leveur de frein) et rend donc possible une construction compacte.

Les masses en mouvement d'un moteur-stop étant faibles, ce dernier est très bien adapté pour une exploitation où interviennent des inversions du sens de marche, ou pour une exploitation exigeant de nombreuses manœuvres (dans certains cas particuliers jusqu'à 1500 manœuvres par heure).

Le freinage énergique évite les longs temps morts et permet une exploitation optimale des installations de manutention. Le moteur-stop trouve sa principale utilisation dans l'équipement de petits appareils de levage et de bandes de transport réversibles.

Il arrive souvent qu'une seconde vitesse de fonctionnement, utilisée pour la marche lente, soit nécessaire dans les appareils de levage. Cette nécessité a conduit, d'une part à la construction de moteurs-stop à commutation des pôles (en général les vitesses sont dans un rapport de 1 à 2 pour les moteurs à couplage de Dahlander et de 1 à 4 pour les moteurs équipés de deux enroulements), d'autre part au développement de bimoteurs-stop (fig. 7). Le bimoteur-stop est issu de l'accouplement, par l'intermédiaire d'un train d'engrenages, de deux moteurs-stop.

Dans la figure 8, on peut voir le principe de fonctionnement d'un tel moteur. Lorsqu'on alimente le moteur d'entraînement à marche lente, ce dernier se libère de son frein grâce à l'action de la force électromagnétique axiale, qui fait glisser son rotor. Le moteur principal n'étant pas alimenté, il est entraîné par l'intermédiaire de son frein, jouant le rôle d'embrayage, dont la partie extérieure est reliée au moteur à marche lente par un train d'engrenages. Si, par contre, le moteur principal est alimenté, la force électromagnétique axiale le libère et rompt la liaison avec le moteur secondaire.

Le choix des nombres de pôles, pour le moteur principal et le moteur à marche lente, ainsi que le choix du rapport du train d'engrenages, permettent d'obtenir une grande variété de combinaisons.

Le bimoteur-stop, grâce à sa rotation lente et à son freinage efficace, représente le dispositif d'en-

traînement idéal pour les appareils de levage, exigeant un positionnement exact.

Il est possible de débloquer le moteur-stop à l'arrêt pendant une courte période par alimentation monophasé de ce dernier. Cette alimentation provoque également une force électromagnétique axiale, débloquant le frein. Pour un déblocage de longue durée du moteur, nous livrons des dispositifs mécaniques de déblocage.

Le moteur-stop Brown Boveri a subit ces dernières années un nouveau développement, aussi bien du point de vue électrique que mécanique. Nous disposons actuellement d'une nouvelle série dont les puissances s'échelonnent entre 0,35 et 20 ch (pour des vitesses de rotation de 750, 1000, 1500 et 3000 t./min). Les carcasses, satisfaisant à la classe de protection P 33, sont complètement fermées et ont des dimensions conformes aux recommandations de la CEI. Ils peuvent être livrés avec des pieds ou une bride de fixation.

Le moteur-stop, grâce à sa conception, ses possibilités de variation et sa construction compacte, représente la solution optimale du point de vue technique et économique pour certains entraînements d'installations de manutention.

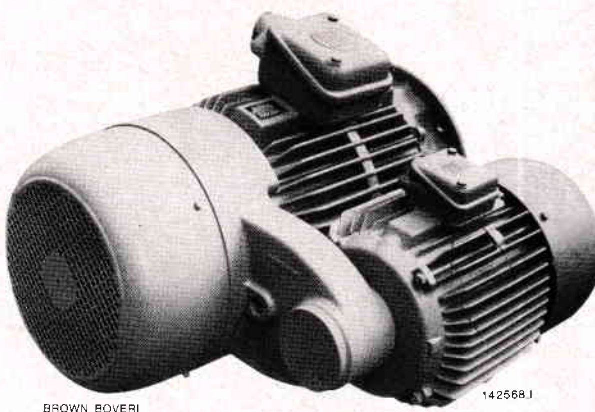


Fig. 7. – Bimoteur-stop triphasé sur pieds, exécution fermée B 3, à ventilation extérieure

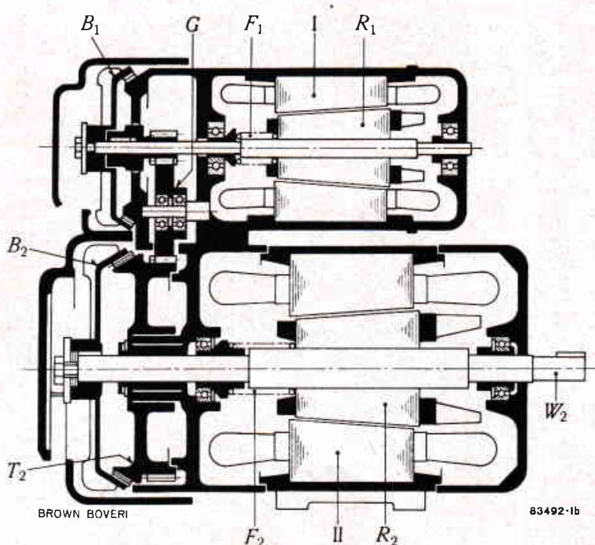


Fig. 8. – Coupe d'un bimoteur-stop à double train d'engrenages

Moteur à marche lente I
R_1 = rotor
F_1 = ressort de frein
B_1 = disque de frein
G = train d'engrenages

Moteur à marche rapide II
R_2 = rotor
F_2 = ressort de frein
B_2 = disque d'embrayage
T_2 = support de garnitures de freinage
W_2 = arbre d'entraînement

Régulateur électronique triphasé construit à partir d'éléments de la technique électronique de puissance Brown Boveri

L'équipement électrique des installations de manutention a été fortement influencé par le développement des composants électroniques. L'automatisation et le dimensionnement optimal d'appareils de levage et de manutention, tels qu'on les rencontre actuellement, seraient impensables sans le développement de ces composants. Dans ce qui va suivre, nous allons parler de la régulation de la vitesse, d'entraînements à moteurs triphasés à l'aide de thyristors ainsi que du traitement des informations à l'aide de dispositifs de comptage et de mémoires.

Si nous considérons le moteur triphasé comme entraînement d'appareils de levage, celui-ci présente à côté d'un certain nombre d'avantages, tels que la simplicité, la robustesse, un faible prix d'achat, un désavantage non négligeable, à savoir: une mauvaise possibilité de réglage de la vitesse de rotation et du couple.

Le moteur triphasé à bagues, le plus souvent employé, nécessite, pour le réglage de sa vitesse, qui dépend en outre, dans une large mesure, de la charge, surtout aux faibles vitesses, un rhéostat rotorique à gradins (fig. 9).

Des recherches et des essais ont montré, qu'une régulation continue de la vitesse de rotation de moteurs triphasés était possible, par variation continue de la tension d'alimentation du stator [1, 2][1]. Le couple décroît en effet proportionnellement au carré de la tension de stator suivant la relation

$$\frac{T}{T_n} = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2$$

[1] Nombre entre crochets, voir la bibliographie, p. 392.

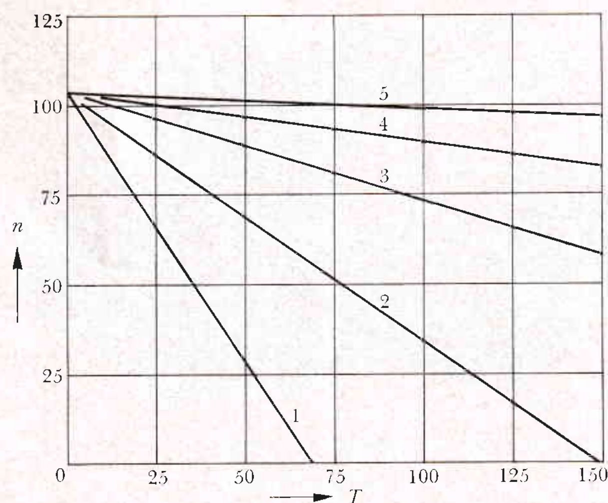


Fig. 9. – Caractéristiques de la vitesse de rotation en fonction du couple de moteurs à bagues

n = vitesse de rotation en % de la vitesse nominale
T = couple en % du couple nominal
1 à 4 = caractéristiques pour plusieurs valeurs de résistances rotoriques
5 = caractéristique pour le rotor en court-circuit

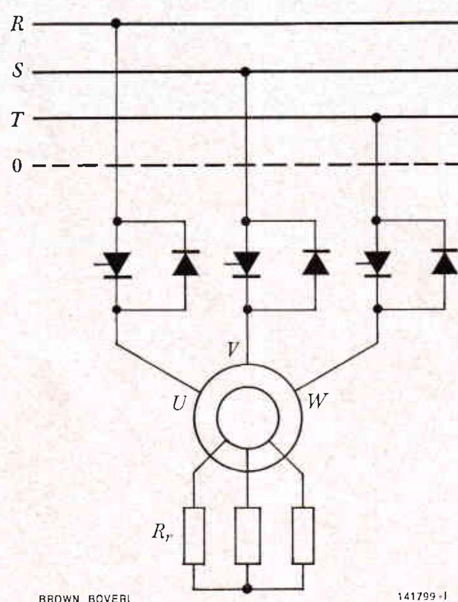


Fig. 10. – Couplage antiparallèle de thyristors et de diodes dans le circuit de stator d'un moteur triphasé à bagues

Le *«régulateur triphasé»*, à couplage antiparallèle de thyristors et de diodes, est devenu, ces dernières années, le dispositif le plus économique pour le réglage de la tension de stator (fig. 10). Le retard du point d'amorçage des thyristors (α_1, α_2) permet de faire varier la tension aux bornes de la charge U_R

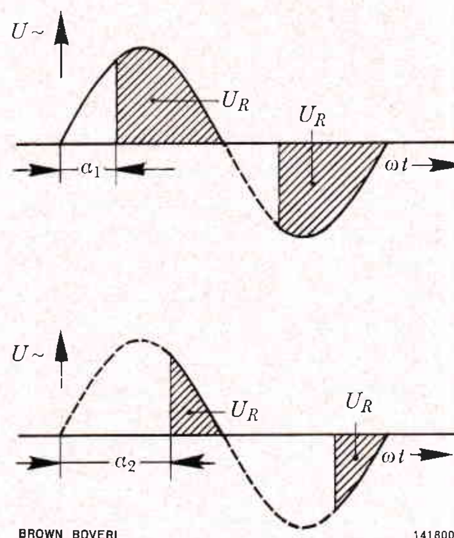


Fig. 11. – Tension aux bornes d'une charge résistive pour une commande à amorçage retardé

entre zéro et la tension nominale (fig. 11). Il est ainsi possible de réaliser un réglage continu du couple et de la vitesse de rotation du moteur. La variation de la tension équivaut, dans le diagramme de la vitesse en fonction du couple, à la variation de l'inclinaison de la droite de charge autour du point de synchronisation. Ce réglage de la tension rend possible un déplacement continu du point de fonctionnement. Il existe, pour une résistance rotorique donnée et pour la tension nominale, une droite qui limite l'étendue du domaine de fonctionnement (fig. 12).

L'inversion du sens de rotation peut également se faire, au moyen de contacteurs ou même sans contacts mobiles, à l'aide de thyristors. Les avantages de ce régulateur électronique sont: une réaction instantanée et un fonctionnement sans usure, une grande souplesse de réglage et une grande sécurité de fonctionnement.

La Société Brown Boveri a développé, pour la technique électronique de puissance, un ensemble d'éléments de construction à tiroirs connu sous le nom de «Thysert» qui trouve également son application en tant que régulateur électronique. Des tiroirs semblables, équipés de thyristors ou de diodes et appelés «Inserts» en sont les éléments de base. Plusieurs de ces éléments mis côte à côte dans des étages normalisés constituent le dispositif de régulation (Thysert, fig. 13).

Le boîtier, en matière plastique résistante, d'un «Inserts» contient le thyristor et son radiateur ainsi que les circuits de protection et le dispositif de commande par gâchette. La partie courants forts est

complètement séparée des circuits de commande. Il est possible de débrancher, sous tension, les connexions des circuits à courants forts, situées à l'arrière des étages, à l'aide de clés spéciales. Chaque élément de puissance peut ainsi être échangé sans obligation de couper la tension d'alimentation. Une signalisation optique des défauts simplifie la surveillance. Le principe de construction par éléments [3] autorise des couplages parallèles ou série, donc une adaptation des circuits à la puissance que doit pouvoir régler le régulateur. La construction, l'exploitation et le service sont simples, sûrs et économiques et répondent aux exigences requises.

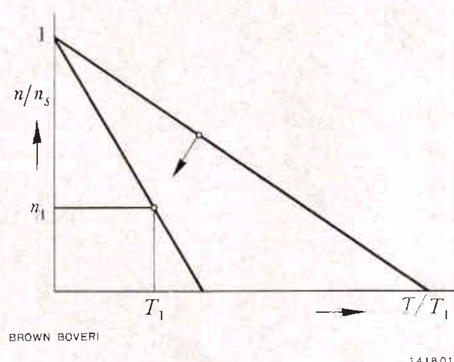


Fig. 12. – Variation de l'inclinaison de la droite de charge autour du point de synchronisation, dans le diagramme représentant la vitesse de rotation en fonction du couple

Emploi de registres et de mémoires à décalage dans les installations de manutention

L'emploi de machines de production rapides et l'exploitation de magasins de grande capacité, conjugués au manque de personnel, ont conduit à l'automatisation et à l'augmentation du rendement des installations de manutention industrielles. La commande de ces installations a nécessité le développement d'appareils et de circuits adaptés à cette technique particulière.

Les principales tâches qui échoient à la commande sont, d'une part; le traitement des informations concernant le genre, l'origine, la destination des objets transportés; d'autre part, l'émission d'ordres programmés destinés aux aiguillages, aux freins, aux haltes, etc. On emploie de plus en plus, pour la réalisation de ces circuits des éléments de construction électroniques tels que des *registres* ou des *mémoires à décalage* dont on va parler plus en détail.

Les installations de manutention se divisent en trois classes suivant leur emploi; ce sont les installations de manutention de distribution, de concentration et de stockage et en deux catégories, suivant leur mode de travail à savoir les convoyeurs à parcours commandé et les convoyeurs à parcours libre. Si une installation comprend les deux catégories, on parle d'une installation mixte (Power and Free Routes). Sur les parcours commandés, les objets transportés sont liés mécaniquement au moyen de transport (par exemple: pièces pendues à un convoyeur à chaîne). Sur les parcours libres, par contre, ceux-ci progressent librement.

Prenons comme exemple une installation mixte, le convoyeur à chaîne employé dans l'industrie et le commerce. La charge est liée mécaniquement à un wagon roulant sur un rail. L'entraînement du wagon a lieu par l'intermédiaire d'une chaîne avançant à vitesse constante sur un second rail. Le chargement

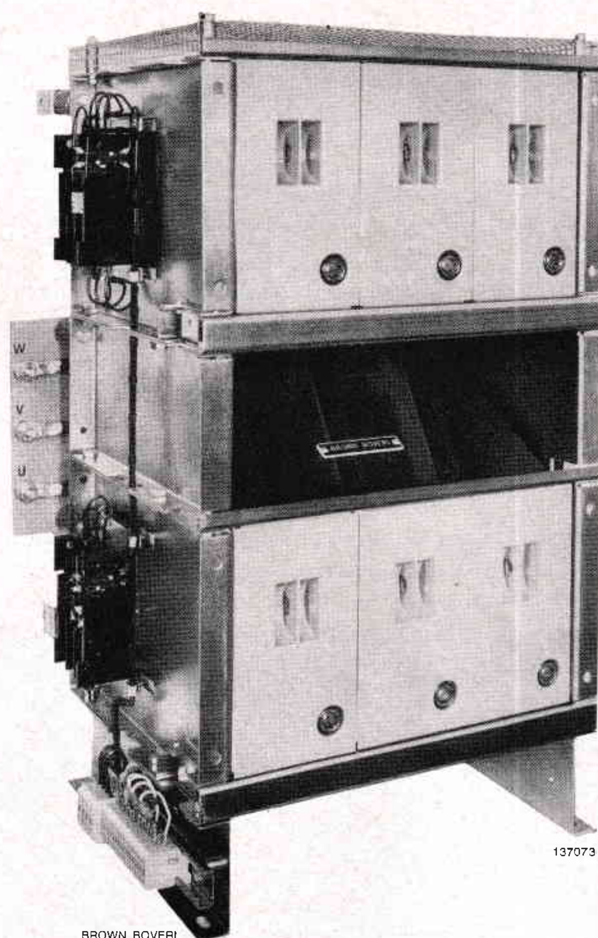


Fig. 13. – Thysert, type CE a6, redresseur comprenant six unités Inserts à refroidissement naturel

peut être transporté et arrêté par accouplement ou découplement du wagon à la chaîne de convoyage.

Afin de pouvoir commander automatiquement le convoyage de la marchandise, il est nécessaire de

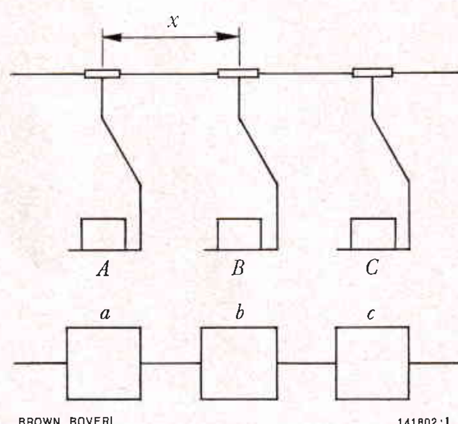


Fig. 14. – Wagons ABC d'un convoyeur à chaîne et informations a, b, c s'y rapportant

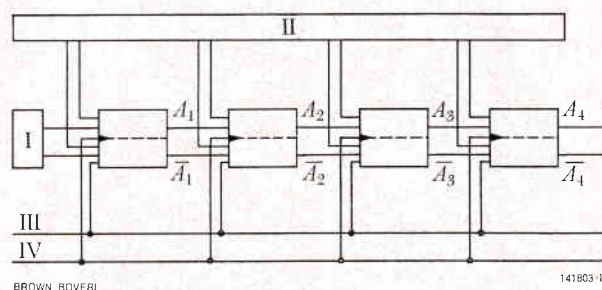


Fig. 15. – Registre à décalage équipé de quatre basculeurs

I = entrée — II = affichage — III = remise à zéro — IV = cadence extérieure

fournir, à l'ordinateur du dispositif de commande, des informations concernant cette marchandise qui serviront à élaborer les ordres commandant le fonctionnement du convoyeur. Dans les cas simples, la marchandise porte elle-même l'indication la concernant. On utilise des contacts de fin de course mécaniques ou magnétiques, des cellules photoélectriques, pour déchiffrer l'information codée. Cette méthode de transport de l'information par la marchandise elle-même a des avantages (il est possible d'ajouter ou de retirer un wagon quelconque du convoyeur, car il porte son information), cependant elle ne peut plus être employée dans les installations modernes, car le nombre des informations nécessaires devient trop important.

La place importante, nécessaire aux dispositifs d'identification et la précision mécanique, exigée par les dispositifs de lecture ainsi que les frais d'entretien, se sont avérés comme étant des désavantages et ont fait préférer d'autres solutions.

Une solution à ce problème de la transmission des informations dans les installations de manutention modernes est la reproduction de la ligne de transport au moyen de circuits électroniques, tels que les registres et les mémoires à décalage [4, 5].

Considérons la ligne de transport commandée du convoyeur à chaîne déjà cité, sur laquelle les wagons sont liés mécaniquement avec cette chaîne à des intervalles fixes x (fig. 14).

A vitesse d'avancement constante, les wagons désignés par les lettres A, B et C ne se suivent pas seulement toujours dans le même ordre, mais ils progressent, pour des intervalles de temps égaux de la même longueur de parcours x. Si les lettres a, b et c représentent les informations correspondant aux wagons, celles-ci doivent avancer en synchronisme avec les wagons. Il est nécessaire que, lorsqu'un wagon arrive à un point, où une décision doit être prise, l'information concernant ce wagon arrive également au même point dans la représentation électronique de la ligne de transport, afin que les ordres de commande puissent être émis par l'ordinateur au moment opportun.

La mémorisation et l'avancement de l'information en synchronisme avec la marchandise transportée, se fait à l'aide de registres à décalage. Une mémoire, composée dans le cas le plus simple de quatre basculeurs bistables, est associée à chaque wagon (fig. 15).

Le code binaire décimal permet le comptage d'informations portant les chiffres de 0 à 9. Les quatre signaux nécessaires apparaissent aux sorties A_1, A_2, A_3 et A_4 des basculeurs.

Les entrées de ces basculeurs sont alimentées par l'intermédiaire de circuits «ET» ne laissant passer les signaux présents à leurs entrées que lorsqu'un signal dynamique de cadence en provenance d'un rythmeur externe leur est fourni. Tous les basculeurs réagissent à chaque impulsion de la cadence et leurs informations glissent d'un emplacement dans la mémoire. Après 4 impulsions de cadence, la tétrade a transmis son information à la suivante et reçu une nouvelle information de la précédente. Pendant ce temps les wagons ont tous avancé d'un intervalle. Les premiers et les derniers emplacements d'un registre à décalage sont connectés respectivement aux registres précédent et suivant de telle sorte que les informations passent d'un registre à l'autre à la cadence donnée par le rythmeur externe.

Les dispositifs de commande annexes permettent d'obtenir des signaux de sortie de la mémoire bien définis (par exemple A_1 à A_4 présentant un zéro) ainsi que la mise en mémoire d'informations quelconques.

Sur les lignes de transport à parcours libre, la liaison mécanique entre l'entraînement et les objets transportés n'existe plus (par exemple un wagon dé-

couplé de la chaîne d'entraînement roulant librement sur ses rails). La cadence donnée par l'entraînement disparaît, il n'est pas possible de faire avancer ces objets en synchronisme avec l'information correspondante. Seul l'ordre des opérations reste défini. Il n'est plus possible d'employer un registre à décalage. Dans ce cas la représentation électronique de la ligne de transport et la progression des informations se font au moyen de mémoires à glissement dont le principe de fonctionnement est visible sur la figure 16.

A chaque section, ne comprenant pas d'embranchements, correspond une mémoire à glissement divisée en autant d'emplacements de mémoire qu'il existe de places sur cette section. A la place de la cadence externe, se substitue une cadence propre (max. 10 kHz) qui fait progresser les informations jusqu'à ce qu'elles prennent un emplacement libre à côté d'un emplacement déjà occupé de la mémoire. L'arrivée d'un wagon sur la section considérée et son départ de celle-ci sont signalés par des impulsions.

A l'arrivée du premier wagon, en provenance des sections *a* ou *b*, dans la section *c*, précédemment inoccupée, l'information correspondante est transmise au premier emplacement de la mémoire correspondant à la section *c*. Cette information subit alors un glissement à l'intérieur de la mémoire indépendamment de la vitesse du wagon, jusqu'au dernier emplacement libre.

Les informations correspondant à d'autres wagons, suivant le premier, subiront le même glissement et viendront occuper les emplacements encore inoccupés précédant ceux occupés par la première information; la cadence d'avancement étant automatiquement bloquée dès que tous les emplacements d'une mémoire sont occupés.

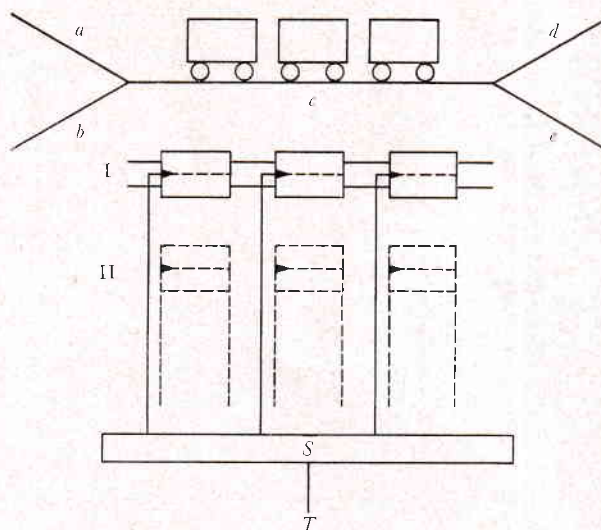


Fig. 16. – Principe de fonctionnement d'une mémoire à glissement

I, II = lignes de mémoire. Leur longueur dépend de l'information à transmettre par chargement à transporter

S = dispositif électronique commandant le blocage des impulsions de la cadence

T = cadence extérieure (cadence maximale 10 kHz)

Lorsqu'un wagon quitte la section pour entrer dans la section suivante, l'information qui lui correspond est également transmise à la mémoire suivante.

La structure des mémoires à glissement est la même que celle des registres; on y retrouve les mêmes éléments de base. Le nombre de cellules de la mémoire dépend également de l'importance de l'information à transmettre par unité de transport. Si par exemple chaque wagon dispose d'une information compre-

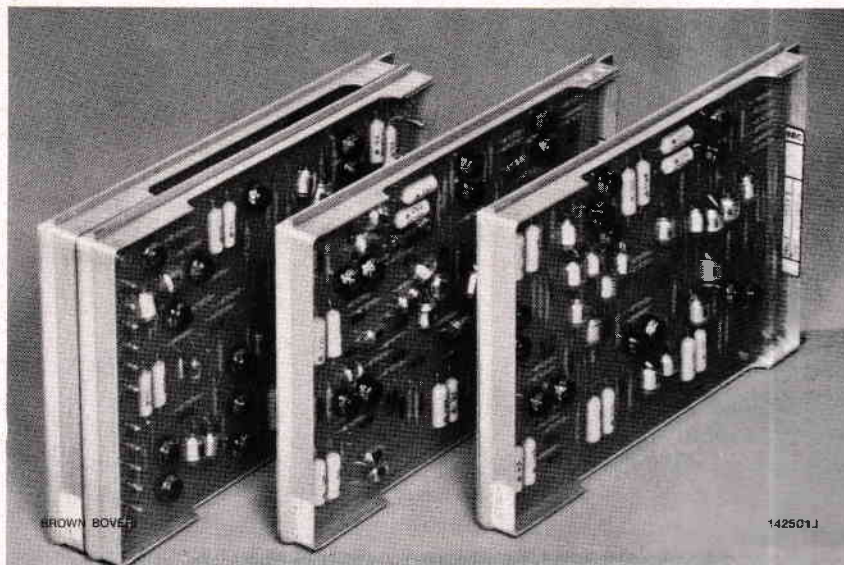


Fig. 17. – Plaquettes de la technique électronique Brown Boveri, à droite un registre à 4 bits

nant un nombre décimal de quatre chiffres, quatre emplacements de mémoire sont nécessaires, chaque emplacement comprenant quatre bits et pouvant représenter un nombre décimal.

L'introduction manuelle d'informations préalables dans une mémoire de présélection est également possible. Ces informations sont mémorisées dans leur ordre d'inscription et l'arrivée du premier wagon chargé sur la section provoque la transmission de l'information correspondante de la mémoire de préselection à la mémoire à glissement.

Les registres et les mémoires à décalage sont constitués à partir d'éléments de la technique électronique Brown Boveri [6] dont les circuits de base sont montés sur des plaquettes normalisées (fig. 17).

Les plaquettes sont des circuits imprimés enfichables.

Le «sous-ensemble» représente une autre unité constructive de cette technique, celui-ci, comprenant plusieurs plaquettes, forme un groupe fonctionnel. Le sous-ensemble est disposé dans un étage normalisé. Plusieurs étages peuvent être montés sur le cadre pivotant d'une armoire. On peut conclure que les commandes automatiques, équipées d'éléments électroniques, se distinguent par une construction compacte, une grande vitesse de réaction, une grande sécurité de fonctionnement et une faible usure.

(B. T.) BRUNO GRADINGER

Bibliographie

[1] F. KORB: Einstellung der Drehzahl von Induktionsmaschinen durch antiparallele Ventile auf der Netzseite. *Elektrotech. Z.*, Edition A 1965, n° 8, p. 275 à 278.

[2] K. GERNER et K. HAGER: Neuer Thyristorantrieb für Hebezeuge. *BBC-Druckschrift* JB 1008/5, tirage à part de la revue Deutsche Hebe- und Fördertechnik, n° 11, 1966.

[3] H. PISECKER et X. VOGEL. Le «Thysert», nouvelle construction de convertisseur statique à éléments débrochables. *Rev. Brown Boveri*, t. 54 (1967), n° 5/6, p. 241 à 250.

[4] H. HECKMANN et W. HINSCH: Transistorzähler und Schieberegister. *BBC-Nachr.*, vol. 45 (1963), n° 4/5, p. 215 à 221.

[5] W. WENZ, R. NEUMANN et D. TAUS: Elektronische Ausrüstung einer modernen Wagenumlaufanlage. *BBC-Nachr.*, vol. 48 (1966), n° 8, p. 489 à 496.

[6] H. BRÄNDLE et K. STAHL: Les principes de la technique électronique Brown Boveri. *Rev. Brown Boveri*, t. 47 (1960), n° 10/11, p. 661 à 670.

EN BREF

Résultats d'exploitation obtenus à la centrale de Weisweiler (RWE) avec un dispositif de protection pour générateur

621.316.9:621.313.322:621.38

En 1966 fut installé, à la centrale de Weisweiler de la Société Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk (RWE), un dispositif de protection électronique, destiné à la protection du groupe E de cette centrale. Ce générateur, couplé directement à son transformateur, a une puissance de 400 MVA. Le dispositif de protection est branché sur l'enroulement primaire en parallèle avec le relais de protection mécaniques. Les signaux, issus du dispositif de protection, sont enregistrés depuis octobre 1966 par un dispositif d'enregistrement chronologique.

Le dispositif de protection du générateur est composé essentiellement de trois relais différentiels, un pour le générateur proprement dit, un pour le transformateur et un pour le transformateur auxiliaire triphasé. Il comprend en outre un dispositif de protection contre les défauts à la terre du stator, ayant une plage de protection à 100%, un dispositif de protection contre les courts-circuits entre spires, un dispositif de protection contre les surintensités sur les trois phases équipé d'un indicateur visuel, un dispositif de protection contre les surtensions, un dispositif de protection contre les charges asymétriques et enfin un dispositif de protection contre les défauts à la terre du rotor. Un relais de protection à retour de puissance est également prévu pour la protection du générateur fonctionnant en moteur.

Ce relais est, du point de vue de son fonctionnement physique, semblable au relais mécanique, il est cependant construit selon le principe de l'assemblage d'éléments de construction. L'emploi d'éléments statiques pour les dispositifs de mesure, a permis une amélioration des caractéristiques techniques, entre autre le pourcentage de retour. Les différents relais sont montés dans des étages normalisés, eux-mêmes fixés sur des cadres pivotants, formant ainsi des unités compactes. Pour les essais, on avait monté un répartiteur à barres croisées permettant de connecter chaque sortie de chacun des relais sur les circuits de commande ou de signalisation.

Après la mise en service, quelques signalisations erronées furent enregistrées, dont les causes n'ont pu être déterminées. Après quelques mises au point, le fonctionnement fut correct. Le dispositif de protection réagit plusieurs fois à bon escient et détecta une fois un défaut à l'arbre de la turbine et une autre fois un défaut à la terre sur la ligne de départ du générateur survenu à la suite d'essais de coupure en charge, chaque fois correctement. A l'arrêt du groupe le relais de protection à retour de puissance a fonctionné chaque fois correctement.

Nous avons ainsi acquis, pour ce relais, des résultats d'exploitation couvrant une période de plus de deux ans, qui nous seront utiles pour la mise au point de ce dispositif dont une quantité importante est livrée et une partie est déjà en service. Les principaux avantages de ce dispositif de protection sont: un encombrement plus réduit que celui des relais mécaniques utilisés jusqu'à présent et la possibilité de livrer une unité complètement cablée et contrôlée en usine.

(B.T.) HELMUT UNGRAD

Essais d'une bobine de compensation de 100 Mvar, 400 kV, au poste de transformation Breite, des Forces motrices du nord-est de la Suisse (NOK)

621.318.43.001.4

A la suite de l'adjudication d'une commande, comprenant au total sept bobines de compensation triphasées, d'une puissance réactive de 100 Mvar sous 400 kV, faite par l'Electricity Supply Commission de Johannesbourg, il fut exigé que ces bobines soient soumises à des essais d'échauffement en triphasé, accompagnés de mesures de pertes, de bruit et de vibrations. Ces essais devaient être faits sous la tension maximale de service de 420 kV. Une puissance triphasée, équivalente à celle de la bobine de compensation, devait être disponible, à la tension de service maximale, pour ces essais. Vu que nous ne disposons que d'une puissance monophasée à notre plate-forme d'essais de Baden, il fallut trouver une autre solution.

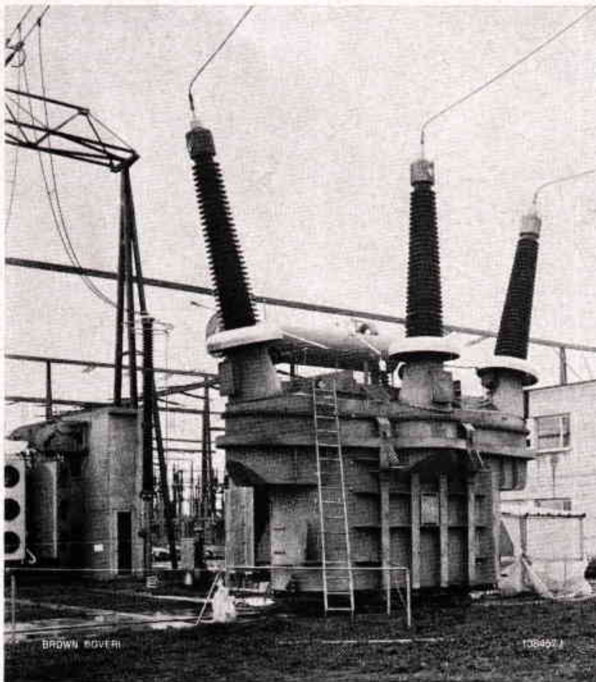


Fig. 1. – Bobine de compensation triphasée de 100 Mvar, 420 kV, 50 Hz, prête à subir les essais de réception, au poste de transformation Breite, des Forces motrices du nord-est de la Suisse (NOK)

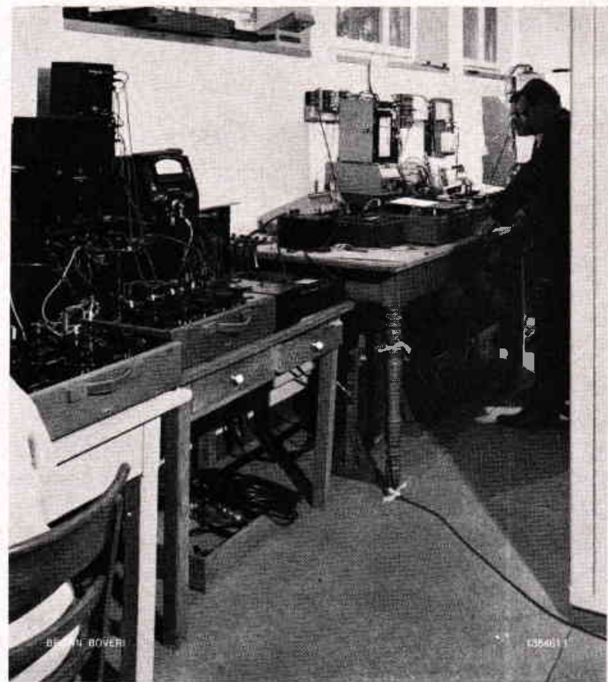


Fig. 2. – Installation de mesure provisoire pour l'essai d'une bobine de compensation triphasée

Au premier plan, les ponts de mesure, au fond, les enregistreurs

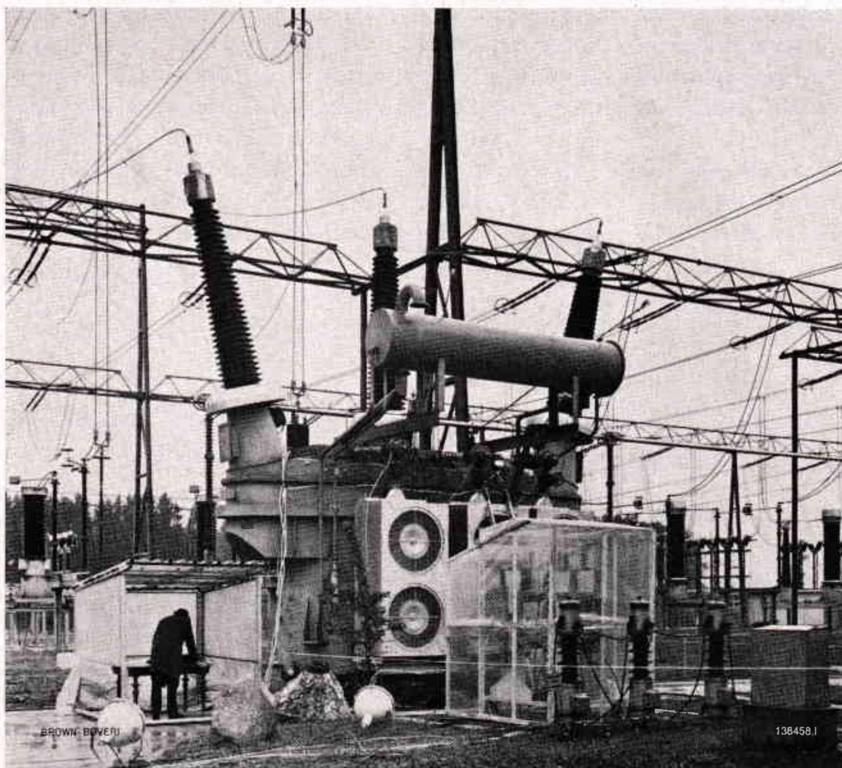


Fig. 3. – Bobine de compensation triphasée de 100 Mvar, 420 kV, 50 Hz, pendant les essais de réception

Au premier plan les trois transformateurs de courant du point neutre et les sectionneurs

La direction de la Société des Forces motrices du nord-est de la Suisse à Baden nous autorisa aimablement à procéder à ces essais dans son poste de transformation Breite situé près de Winterthour. Il fallut cependant effectuer ces essais en fin de semaine, lorsque la puissance exigée était disponible. De plus il fallut débrancher un transformateur du réseau afin de pouvoir élever la tension de 220 kV ou 380 kV à 420 kV; le compensateur, équipant le poste de transformation, a fourni la puissance réactive nécessaire au réglage fin de la tension.

La bobine d'inductance, d'un poids total d'environ 90 t, fut transportée de nuit au poste de transformation Breite, en traversant la ville de Zurich; une fois arrivée, cette dernière, reposant sur des rails, fut préparée pour les essais (fig. 1 et 3). Le branchement choisi ainsi que le couplage au transformateur de 600 MVA exigeaient une transformation des lignes de distribution à l'intérieur du poste. Cette transformation devait être faite juste avant le début des essais, lorsque la demande de puissance baissait et autorisait un débranchement partiel du poste. Avant d'effectuer le branchement, on procéda à l'installation provisoire des appareils de mesure dans un coin du bâtiment abritant le compensateur (fig. 2).

En plus de ces essais, faits avec une puissance triphasée, nous avons proposé au client de refaire, en monophasé, sur notre plate-forme d'essais pour transformateurs, toute la série d'essais. Nous voulions prouver par cette série d'essais que les résultats des essais, en triphasé et en monophasé, étaient comparables et rendaient donc inutiles les premiers.

Les essais de réception se déroulèrent à la satisfaction totale des ingénieurs de réception du client. A la suite des essais comparatifs, en triphasé et en monophasé, faits sur les deux premières bobines de compensation, d'autres essais, en triphasé, furent inutiles. Les cinq autres bobines de compensation furent soumises à des essais simplifiés, en monophasé, faisant office d'essais de réception et servant à contrôler les valeurs de garantie telles que: l'impédance, les pertes, le bruit, les vibrations et l'échauffement.

(B. T.) HERMANN WENGER

Publications de collaborateurs parues dans diverses revues

ABEGG K.: Forschung und Entwicklung in der Energietechnik. *Elektrizitätsverwertung*, vol. 43 (1968), n° 1, p. 1 à 14.

ANWANDER E.: Halbleiterstromrichter für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. *Elektrotech. Z.* Ausg. A, vol. 89 (1968), p. 183 à 189.

BERIGER C. et al.: Blindleistungsbedarf und Filterkreise der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. *Elektrotech. Z.* Ausg. A. vol. 89 (1968), n° 9, p. 197 à 205.

BLUM R.: Impulskorrektureinrichtung für schnelle Impulsübertragung auf Telephonleitungen. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.68.

DZUNG L.S.: Ermittlung der Toleranzen für Wärmegefälle und Enthalpiedifferenzen des Wasserdampfes. *Brennstoff, Wärme, Kraft*, vol. 20 (1968), n° 3, p. 97 à 99.

EDLINGER A.: Transformatoren und Drosselspulen für die HGÜ. *Elektrotech. Z.* Ausg. A, vol. 89 (1968), n° 8, p. 189 à 196.

EGGIMANN F.: Informationsübertragung über Mikrowellen. *Bull. Ass. suisse Elect.*, vol. 59 (1968), n° 2, p. 65 à 72.

EHRENSPERGER CH.: Von der individuellen zur internationalen Norm. *Bull. Ass. suisse Elect.*, vol. 59 (1968), n° 13, p. 594 à 607.

FREY W. et H. GLAVITSCH: Analog- und Hybridrechner. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik», n° 51 du 24.1.1968.

FUNK G.: Datenaustausch- und -steueranlage (DASA). *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

GLANTSCHNIG F. et H. DÄHNERT: Die NC-Entwicklung in der Schweiz. Gegenwärtiger Stand der Entwicklung und Anwendung in den schweizerischen Produktionsbetrieben. *Tech. Rdsch.*, vol. 60 (1968).

GLANTSCHNIG F. et J. TSCHUMI: Koordinatenbohr- und -schleifmaschinen mit numerischem Steuersystem. *Tech. Rdsch.*, vol. 60 (1968), n° 28, p. 9 à 15.

GLAVITSCH H.: Möglichkeiten der Verbesserung der Stabilität und der Spannungsregelung von Synchronmaschinen mit Hilfe der Gleichrichtererregung. *Elektrotech. u. Maschinenbau*, vol. 85 (1968), n° 2, p. 58 à 65.

GRÜTTER F.: Einige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Zentrallaboratoriums. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.68.

HÜBNER R.: Neue optisch-elektronische Verstärkerelemente. *Microtechnic*, vol. 22 (1968), n° 1, p. 35 à 37.

HÜBNER R.: Integrierte Schaltungstechnik. *Automatik*, vol. 13 (1968), n° 1, p. 12 à 16.

KÄCH A. et H. FAHRNI: Mikrowellen-Nachrichtengeräte in Halbleitertechnik. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

KNAPP P. et H. LÖCKER: Stromsteller für Gleichstrom-Triebfahrzeuge. *Elektrotech. u. Maschinenbau*, vol. 85 (1968), n° 3, p. 110 à 117.

MEIER W.: Moderne physikalische Verfahren der chemischen Analyse und der Strukturforschung. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

NECK H.: Kurzwellensender. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

PAUL H.: Bahnstörungen bei geostationären Nachrichtensatelliten. *Bull. Ass. suisse Elect.*, vol. 59 (1968), n° 5, p. 215 à 224.

RIEDER W.: Verfahren der Leistungsunterbrechung in Hochspannungsnetzen. *Sci. Elect.*, vol. 14 (1968), n° 1, p. 1 à 19.

ROOS W.: Ein transistorisierter Entzerrer für Farbfernsehsender. *Bull. Ass. suisse Elect.*, vol. 59 (1968), n° 13, p. 588 à 594.

ROTH K. et al.: Ergebnisse der Gefässforschung in der Arbeitsgemeinschaft Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. *Elektrotech. Z.* Ausg. A, vol. 89 (1968), n° 8, p. 176 à 183.

SARBACH E. et al.: Isolationskoordination in Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsanlagen. *Elektrotech. Z.*, Ausg. A, vol. 89 (1968), n° 9, p. 204 à 208.

SCHLIENGER W.: Sprachverschlüsselungsgeräte. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

SCHOBER J. et W. STRITTMATTER: Über den Einfluss geringer Wassergehalte auf die Durchschlagsfestigkeit von Isolierflüssigkeiten. *Bull. Ass. suisse Elect.*, vol. 59 (1968), n° 1, p. 13 à 18.

SCHÖNHUBER M.J.: Ergebnisse der Gefässforschung in der Arbeitsgemeinschaft Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung. *Elektrotech. Z.*, Ausg. A, vol. 89 (1968), n° 8, p. 176 à 183.

SCHÖNSLEBEN M.: Informationsübertragung über Hochspannungsleitungen. *Bull. Ass. suisse Elect.*, vol. 59 (1968), n° 1, p. 19 à 25.

SPEISER A.P.: Wissenschaftliche Forschung als Grundlage für technische Neuerungen. *Schweiz. Arbeitgeber-Zeitung*, vol. 62 (1967), n° 49, p. 951 à 954, et *technica*, vol. 16 (1967), n° 25, p. 2563 à 2566.

SPEISER A.P.: Forschung in einem Industriebetrieb. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

SPEISER A.P. et al.: Forschung und Entwicklung bei der AG. Brown, Boveri & Cie., Baden. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

TIESNES M.: Steuerung von Lenkwaffen. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

VOUETS W.: Steam-gas Turbines. *Energy int.*, vol. 5 (1968), p. 19 à 22.

WIEDEMANN E.: Internationale Entwicklung von Grossturbogeneratoren. *Elektrizitätswirtschaft*, vol. 67 (1968), n° 10, p. 249 à 255.

WILLISEN F.K.: Ausgewählte Laseranwendungen. *Nouv. Gaz. Zurich*, Beil. «Technik» du 27.3.1968.

Silizium-Gleichrichter-Handbuch 1968. 300 pages, avec de nombreux tableaux et diagrammes; reliure en toile. Ed. par la Société Anonyme Brown, Boveri & Cie, Baden/Suisse. En ventes en librairies.



Editeur: Société Anonyme Brown, Boveri & Cie, Baden (Suisse). Imprimé par Kreis & Cie S.A. à Bâle
Distributeur pour la France: Cie Electro-Mécanique, 12, rue Portalis, Paris (8e)